



Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya

Editor:

Fahmuddin Agus
Abdurachman Adimihardja
Sarwono Hardjowigeno
Achmad Mudzakir Fagi
Wiwik Hartatik



**PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
TANAH DAN AGROKLIMAT**

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Departemen Pertanian
2004



Penanggung jawab : Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat

Penyunting : Fahmuddin Agus
Abdurachman Adimihardja
Sarwono Hardjowigeno
Achmad Mudzakir Fagi
Wiwik Hartatik

Redaksi Pelaksana : Herry Sastramihardja
Sri Erita Aprillani
Farida Manalu

Setting/Layout : Didi Supardi

Penerbit : Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat (Puslitbangtanak)
Jl. Ir. H. Juanda 98 Bogor 16123,
Jawa Barat
Telp. (0251) 323012, Fax : (0251) 311256
E-mail : csar@indosat.net.id

Penulisan dan pencetakan buku ini dibiayai dengan dana APBN Bagian Proyek Penelitian Sumberdaya Tanah (BP2ST) Tahun Anggaran 2004, Balai Penelitian Tanah, Bogor
<http://balittanah.litbang.deptan.go.id>

KATA PENGANTAR

Sawah merupakan salah satu bentuk penggunaan lahan yang sangat strategis karena lahan tersebut merupakan sumber daya utama untuk memproduksi padi/beras, yang merupakan pangan pokok utama bagi Indonesia. Dengan demikian, sawah merupakan sumber daya utama bagi pemantapan ketahanan pangan dan pertumbuhan ekonomi nasional. Walaupun demikian, sejauh ini belum ada referensi berbahasa Indonesia yang secara komprehensif membahas genesis, sifat kimia, fisika, dan biologi serta pengelolaan tanah sawah, padahal referensi tersebut sangat diperlukan untuk acuan dalam pengelolaan tanah sawah. Oleh karena itu penerbitan buku ini sangat penting, karena informasi yang dikandung dalam buku ini akan sangat berguna bagi para pihak yang memerlukan informasi tentang tanah sawah dan teknologi pengelolaannya, termasuk aspek lingkungan dan multifungsi sawah.

Saya mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada semua pihak yang telah berupaya mengumpulkan data maupun informasi tentang tanah sawah dan menyusunnya dalam buku ini. Semoga hasil karya ini bermanfaat dalam mendukung pemantapan ketahanan pangan dan pembangunan pertanian nasional.

Bogor, Desember 2004
Kepala Badan Penelitian dan
Pengembangan Pertanian

Dr. Ir. Achmad Suryana

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR ISTILAH (<i>GLOSSARY</i>)	v
I. KARAKTERISTIK LAHAN SAWAH	
1. MORFOLOGI DAN KLASIFIKASI TANAH SAWAH <i>Sarwono Hardjowigeno, H. Subagyo, dan M. Luthfi Rayes</i>	1
2. MINERALOGI, KIMIA, FISIKA, DAN BIOLOGI LAHAN SAWAH <i>Bambang Hendro Prasetyo, J. Sri Adiningsih, Kasdi Subagyo, dan R.D.M. Simanungkalit</i>	29
II. TEKNOLOGI PENGELOLAAN TANAH SAWAH	
3. STATUS HARA TANAH SAWAH UNTUK REKOMENDASI PEMUPUKAN <i>Agus Sofyan, Nurjaya, dan Antonius Kasno</i>	83
4. TEKNOLOGI PENGELOLAAN HARA TANAH SAWAH BUKAAN BARU <i>Didi Ardi Suriadikarta dan Wiwik Hartatik</i>	115
5. TEKNOLOGI PENGELOLAAN HARA TANAH SAWAH INTENSIFIKASI <i>Diah Setyorini, Ladiyani Retno Widowati, dan Sri Rochayati</i>	137
6. TEKNOLOGI PUPUK MIKROBA UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PEMUPUKAN DAN KEBERLANJUTAN SISTEM PRODUKSI PADI SAWAH <i>Rasti Saraswati, Tini Prihatini, dan Ratih Dewi Hastuti</i>	169
7. PENGELOLAAN AIR PADA TANAH SAWAH <i>Kasdi Subagyo, Ai Dariah, Elsa Surmaini, dan Undang Kurnia</i>	193
III. PROSPEK PERLUASAN LAHAN SAWAH DAN ASPEK LINGKUNGAN	
8. PELUANG PERLUASAN LAHAN SAWAH <i>Sofyan Ritung, Anny Mulyani, Budi Kartiwa, dan H. Suhardjo</i>	227
9. TEKNOLOGI PENGENDALIAN PENCEMARAN LAHAN SAWAH <i>Undang Kurnia, Husen Suganda, Rasti Saraswati, dan Nurjaya</i>	253
10. MITIGASI GAS METAN DARI LAHAN SAWAH <i>Prihasto Setyanto</i>	289
11. ALIH GUNA DAN ASPEK LINGKUNGAN LAHAN SAWAH <i>Fahmuddin Agus dan Irawan</i>	307

DAFTAR ISTILAH (*GLOSSARY*)

Agroteknologi: Teknologi pertanian.

Alih guna lahan: Peralihan penggunaan lahan, misalnya dari hutan menjadi lahan perkebunan, lahan sawah menjadi areal permukiman dan seterusnya.

Ameliorasi: Pemberian bahan tertentu untuk memperbaiki sifat kimia, fisik, dan biologi tanah. Bahan yang digunakan dapat berupa bahan organik, kapur, dolomit dan secara umum dinamakan amelioran.

Aquorizem: Tanah sawah yang mempunyai profil tanah sawah tipikal. Istilah ini sering digunakan oleh para ahli tanah sawah di Jepang.

Bagan warna daun (*Leaf Color Chart – LCC*): Bagan warna untuk mengukur tingkat ketersediaan dan takaran pemupukan nitrogen pada tanaman padi pada waktu dan umur tanaman tertentu.

Bahan berbahaya dan beracun (B_3): Bahan-bahan yang termasuk ke dalam salah satu golongan atau lebih dari: (1) bahan beracun; (2) bahan peledak; (3) bahan mudah terbakar/menyala; (4) bahan oksidator dan reduktor; (5) bahan mudah meledak dan terbakar; (6) gas bertekanan; (7) bahan korosi/iritasi; (8) bahan radioaktif; dan (9) bahan beracun berbahaya lain yang ditetapkan oleh SK Menteri Perindustrian No. 148/M/SK/4/1985.

Bahan organik tanah: Hasil dekomposisi serasah tumbuhan, hewan yang mati, produk sintesa mikroba, serta asam-asam organik.

Bahan-bahan agrokimia: Pupuk dan pestisida yang digunakan secara luas dalam budi daya pertanian.

Bakteri aerobik: Kelompok bakteri yang hanya dapat tumbuh bila ada molekul oksigen, contoh: organisme aerob

Bakteri anaerob fakultatif: Kelompok bakteri yang dapat tumbuh dalam keadaan ada maupun tidak ada molekul oksigen.

Bakteri anaerob: Kelompok bakteri yang hanya dapat tumbuh bila tidak ada molekul oksigen.

Bakteri endofitik: Kelompok bakteri rizosfir yang mampu hidup dalam jaringan tanaman.

Bakteri fotosintetik: Kelompok bakteri yang dapat melakukan fotosintesis, menggunakan cahaya matahari sebagai sumber energi dan karbondioksida sebagai sumber karbon.

Bakteri heterotrofik: Kelompok bakteri yang dapat memanfaatkan sumber karbon dan sumber energi dari bahan organik.

Bioaktivator: Aktivator biologis perombakan bahan organik.

Bioremediasi: Upaya menanggulangi pencemaran lahan dengan memanfaatkan mikroba sebagai perantara dalam reaksi kimia dan proses fisik secara metabolik, baik di atas permukaan tanah (*ex situ*) maupun di dalam tanah (*in situ*).

Cekaman air (*water stress*): Kondisi di mana tanaman kekurangan air dan menjadi layu akibat dari defisit neraca air.

Chemical blending: Proses pembuatan pupuk majemuk yang dilakukan secara kimia diantara komponen unsurnya melalui beberapa tahapan proses reaksinya (lihat *physical blending*).

Diazotroph: Organisme yang dapat menggunakan N_2 sebagai sumber energi, seperti bakteri penambat N_2 .

Dolomit: Salah satu hasil tambang (bahan galian) batuan kapur yang mengandung unsur Ca dan Mg.

Drainase terputus: Sistem drainase yang diselingi dengan penggenangan pada periode tertentu.

Efisiensi penggunaan air: Hasil tanaman yang diperoleh dari setiap unit penggunaan air irigasi (WU), dan dihitung sebagai $WUE = \text{Hasil}/WU$. Hasil tanaman dapat dinyatakan dalam berat kering atau dalam bentuk biomassa dalam gr.

Efisiensi penggunaan pupuk: Peningkatan hasil suatu tanaman dibagi jumlah pupuk yang diberikan.

Efisiensi pupuk: Rasio antara satu unit pupuk yang ditambahkan dengan produksi (*yield*) tanaman seperti gabah, biji jagung, dan biji kedelai.

Eksternalitas: Produk dan biaya yang tidak nyata (*intangible*) dan tidak mudah dievaluasi, sehingga tidak diperhitungkan di dalam sistem pasar.

Emisi gas metan: Menguapnya gas metan (CH_4) ke atmosfer karena hasil oksidasi tidak sempurna dari bahan organik.

Emisi gas rumah kaca (GRK): Besarnya konsentrasi gas yang dilepaskan ke atmosfer dalam satu satuan luas per satuan waktu. Biasanya dinyatakan dalam satuan $kg\ ha^{-1}\ hari^{-1}$ atau $kg\ ha^{-1}\ musim^{-1}$.

Emisi karbon: (Kebalikan dari penambatan karbon) menguapnya CO_2 dari jaringan tanaman akibat pembakaran atau oksidasi bahan organik.

Erosi: Pengikisan lapisan permukaan tanah oleh tenaga air atau angin.

Eukaryotik: Organisme yang memiliki inti sel dilapisi dua membran dan organel yang membagi sitoplasma, seperti hewan, tanaman, ganggang, fungi, dan protozoa.

Evaporasi: Proses hilangnya air melalui penguapan dari permukaan tanah, permukaan batang dan daun tanaman.

Ferolisis: Proses-proses pelapukan mineral yang diakibatkan oleh pergantian kondisi anaerobik dan aerobik secara terus-menerus. Selama kondisi anaerobik besi fero yang dihasilkan akan mensubstitusi kation dapat dipertukarkan sehingga kation tersebut tercuci. Pada kondisi aerobik hidrogen yang dihasilkan akan mengganti besi fero yang dapat dipertukarkan sehingga mengikis pinggirannya dari kisi oktahedral.

Fitoremediasi: Upaya menanggulangi pencemaran lahan dengan menggunakan berbagai jenis vegetasi atau tanaman yang ditanam pada tanah yang tercemar, dan diharapkan mampu mengurangi atau menyerap logam berat dan B_3 dari dalam tanah.

Fungsi lingkungan: (lihat jasa lingkungan)

Gas rumah kaca: Gas seperti CO₂, CH₄, N₂O dan lain lain yang menyumbang terhadap pemanasan global.

Hara makro: Hara utama yang diperlukan tanaman dalam jumlah yang relatif cukup banyak seperti N, P, K, Ca, Mg, dan S

Hara mikro: Hara yang diperlukan oleh tanaman dalam jumlah sedikit seperti Mn, Mo, Cu, Zn, B, Fe, Bo.

Hara primer: Hara utama yang diperlukan tanaman dalam jumlah relatif paling banyak seperti NPK

Hara sekunder: Hara makro yang diperlukan lebih sedikit dari makro primer tapi lebih tinggi dari hara mikro yaitu Ca, Mg dan S

Imobilisasi: Konversi unsur hara dari bentuk anorganik atau ion ke organik pada mikroba atau biomassa tanaman.

Irigasi sederhana: Sistem irigasi dimana jaringan-jaringan irigasi tidak dilengkapi dengan bangunan irigasi.

Irigasi suplemen: Pemberian tambahan air terhadap air hujan untuk memenuhi kebutuhan air bagi tanaman.

Irigasi teknis: Sistem irigasi dimana jaringan-jaringan irigasi dilengkapi dengan bangunan irigasi permanen dan penakar volume air.

Jasa Lingkungan (*environmental services*): Produk pertanian yang bukan berupa barang. Contoh jasa lingkungan pertanian adalah mitigasi banjir, keanekaragaman hayati, pengurangan erosi dan lain-lain.

Kadar air tersedia: Kadar air tanah antara kondisi kapasitas lapang dengan titik layu permanen.

Kahat hara: Tanah yang mengalami defisiensi/kekurangan unsur hara.

Kalibrasi uji P: Salah satu tahapan dari program uji tanah yang bertujuan untuk menentukan rekomendasi pemupukan pada tanaman tertentu. Kalibrasi uji tanah dilaksanakan di lapangan pada tanah dengan status hara tanah yang bervariasi dari rendah hingga tinggi untuk mendapatkan respon hasil yang optimal.

Kapasitas lapang: Batas kadar air tanah pada kondisi tidak terjadi lagi drainase internal di dalam tanah. Pada umumnya penetapan kadar air pada kapasitas lapang di laboratorium dilakukan pada tegangan air (nilai pF) 2,54, atau penetapan di lapangan menggunakan metode drainase internal.

Kapasitas tukar kation (KTK): Jumlah dari total kation dapat dipertukarkan pada permukaan mineral liat tanah yang dinyatakan dalam cmol kg⁻¹ tanah liat atau koloid tanah.

Klorosis: Perubahan warna daun akibat keracunan atau kekurangan hara.

Kurva karakteristik air tanah: Kurva hubungan antara nilai pF (tegangan air tanah) dengan kandungan air (% volume). Disebut juga sebagai kurva pF atau kurva retensi air tanah.

Lahan sawah: Suatu tipe penggunaan lahan, yang untuk pengelolannya memerlukan genangan air. Oleh karena itu sawah selalu mempunyai permukaan datar atau yang didatarkan (dibuat teras), dan dibatasi oleh pematang untuk menahan air genangan.

Lapisan besi/mangan: Lapisan tanah di bawah lapisan olah, yang memadat dan merupakan horizon iluviasi besi dan mangan. Horizon ini merupakan horizon B dan (sementara) diberi simbol B_{dsm}. Banyak ditemukan pada tanah sawah yang berasal dari bahan vulkan berpasir.

Lapisan olah: Lapisan atas tanah tempat perkembangan akar tanaman semusim dengan ketebalan solum \pm 20 cm.

Lapisan Paitu: Lapisan berwarna pucat terletak di antara lapisan tapak bajak dengan horizon iluviasi dibawahnya. Ditemukan pada beberapa tanah sawah di Cina dan Jepang.

Lapisan tapak bajak (*plow pan*): Lapisan tanah di bawah lapisan olah, yang memadat dan mempunyai bobot isi yang agak tinggi, akibat pengolahan tanah dengan bajak atau alat pengolahan tanah lain dalam keadaan tergenang, atau pemadatan lain oleh tekanan kaki manusia atau binatang, sedangkan lapisan tanah di bawahnya dalam keadaan relative kering. Umumnya merupakan bagian dari horizon A yang tereduksi dan diberi simbol Adg.

Lingkungan biotik dan abiotik: Lingkungan biotik adalah lingkungan yang berkaitan dengan makhluk hidup seperti tumbuhan, hewan dan manusia, sedangkan lingkungan abiotik adalah lingkungan yang berkaitan dengan benda mati seperti batu, air, tanah.

Logam berat: Suatu kesatuan jenis logam yang mempunyai bobot molekul dan berat jenis lebih besar dari 4 g cm⁻³ dengan nomor atom 22-34 dan 40-50, serta mempunyai respon biokimia spesifik pada organisme hidup. Jenis logam berat diketahui lebih dari 70 unsur, beberapa diantaranya perlu mendapat perhatian khusus karena dapat menurunkan kualitas tanah dan tanaman, yaitu Hg, Pb, Cd, Cu, Cr, Co, Mo, Mn, dan Ni.

Management allowable depletion atau maximum allowable depletion (MAD): Derajat kekeringan tanah yang masih diperbolehkan untuk menghasilkan produksi tanaman optimum.

Metan (CH₄): Gas rumah kaca yang dihasilkan melalui dekomposisi bahan organik secara anaerobik. Gas metan mempunyai potensi pemanasan global (*global warming potensial*) 21 kali lebih besar dibanding CO₂.

Mineral mudah lapuk: Kelompok mineral yang mudah melepaskan unsur-unsur penyusunannya karena proses-proses pelapukan. Yang tergolong dalam mineral mudah lapuk diurutkan dari kemudahan melapuknya olivin, apatit, gelas vulkan, serpentin, biotit, augite, amfibol, plagioklas, orthoklas, muskovit, epidot.

Mineral primer: Mineral yang langsung terbentuk dari pengkristalan senyawa-senyawa dalam magma akibat penurunan suhu. Susunan mineral primer dalam tanah sangat tergantung pada bahan induknya. Mineral primer dijumpai pada tanah dalam bentuk fraksi pasir dan sebagian fraksi debu. Mineral primer fraksi pasir maupun debu terbentuk sebagai hasil pelapukan fisik dari mineral penyusun batuan, dari yang tadinya berukuran kerikil, pasir ataupun debu yang tersemam, mengalami pelapukan fisik selama proses pembentukan tanah dan terurai menjadi partikel-partikel berukuran pasir atau debu. Hasil pelapukan fisik batuan yang berupa mineral fraksi pasir maupun debu ini masih mempunyai sifat fisik dan kimia yang sama dengan batuanannya.

Mineral sekunder: Mineral sekunder atau mineral liat adalah mineral berukuran halus (<2 μ m), terbentuk pada waktu proses pembentukan tanah, merupakan hasil pelapukan kimiawi dari mineral primer ataupun hasil pembentukan baru dalam proses pembentukan tanah sehingga mempunyai susunan kimia dan struktur yang berbeda dengan mineral yang dilapuk.

Mineral tahan lapuk (resisten): Kelompok mineral yang tahan terhadap pelapukan fisik maupun kimia. Yang tergolong dalam mineral resisten adalah kuarsa, ilmenit, rutil, dan zirkon.

Mitigasi banjir: Kemampuan suatu sistem penggunaan atau pengelolaan lahan dalam mengurangi intensitas dan frekuensi banjir.

Mitigasi gas rumah kaca (GRK): Upaya manusia untuk menekan atau menghambat laju pelepasan GRK dari sumber pelepasannya.

Model rekomendasi pemupukan: Suatu persamaan regresi yang didapat dari sintesis hasil-hasil penelitian pemupukan dengan memperhatikan sistem tanah-air-tanaman.

Multifungsi pertanian: Manfaat dari pertanian di luar fungsinya sebagai penghasil barang (produk pertanian). Yang termasuk di dalam multifungsi pertanian adalah fungsi lingkungan, fungsi ekonomi, fungsi ketahanan pangan, fungsi sosial, fungsi budaya dan lain-lain.

Nematod: *Eukariot multiseluler* tidak bersegmen, secara mikroskopik berbentuk cacing bulat. Beberapa memakan tanaman, hewan, fungi, dan bakteri.

Neraca air: Perimbangan antara air yang masuk ke dalam suatu batasan hidrologi dengan air yang keluar.

Nitrogenase: Sistem enzimatis spesifik dibutuhkan untuk penambatan N₂ secara hayati.

Olah tanah sempurna (OTS): Tanah diolah sempurna untuk persiapan tanam padi. Pengolahan tanah biasanya meliputi bajak dan dilanjutkan dengan meratakan tanah. Tujuannya adalah untuk membasmi gulma dan memperbaiki sifat fisik tanah.

Panen air (*water harvesting*): Salah satu tehnik konservasi air yang dilakukan dengan menampung air (hujan dan aliran permukaan) pada musim hujan untuk meningkatkan ketersediaan air pada musim kemarau.

Pelandaian produktivitas padi (*leveling off*): Kondisi dimana penambahan per unit *input* hara tidak diikuti dengan peningkatan produksi padi.

Pemakaian air konsumtif (*consumptive water use*): Jumlah air pada suatu areal pertanaman yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan transpirasi, pembentukan jaringan tanaman dan yang diuapkan dari permukaan tanah.

Pemberian air macak-macak: Pemberian air ke lahan sawah hingga kondisi tanah jenuh air, tanpa dilakukan penggenangan.

Pemupukan berimbang: Pemberian pupuk ke dalam tanah untuk mencapai status semua hara esensial seimbang sesuai kebutuhan tanaman dan optimum untuk meningkatkan produksi dan mutu hasil, meningkatkan efisiensi pemupukan, kesuburan tanah serta menghindari pencemaran lingkungan.

Pemupukan spesifik lokasi: Pemupukan yang dilakukan sesuai dengan status hara tanah.

Penambatan karbon (*carbon sequestration*): Pengikatan CO₂ ke dalam jaringan makhluk hidup (umumnya tanaman) sehingga terjadi pengurangan konsentrasi CO₂ di udara.

Penambatan N₂: Konversi molekul dinitrogen (N₂) menjadi amonia dan kemudian menjadi kombinasi organik atau bentuk yang bermanfaat bagi proses biologi.

Pencemaran: Masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan, dan/atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau proses alam, sehingga kualitas lingkungan turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya.

Penggunaan pupuk secara rasional: Aplikasi pupuk sesuai dengan kebutuhan tanaman dan status hara tanah pada waktu dan jenis pupuk yang tepat.

Pengolahan tanah dilumpurkan (*puddling*): Cara pengolahan tanah untuk mendapatkan kondisi tanah menjadi lumpur yang merupakan cara spesifik pengolahan tanah sawah.

Percobaan petak omisi (*omission plot*): Suatu metode penentuan takaran pupuk dimana petak atau plot yang ditanami padi (atau tanaman lain) dan diberikan pengelolaan optimal tanpa pemberian pupuk tertentu. Oleh karena itu hasil panen dari petak *omission plot* sangat tergantung pada kondisi hara di dalam tanah (*indigenous nutrients supply/INS*), tidak pada pupuk.

Permeabilitas: Kemampuan tanah dalam melalukan air. Sebagai pengukur hambatan tanah terhadap aliran air adalah konduktivitas hidrolik (K). Dalam konteks sawah, parameter konduktivitas hidrolik jenuh (*saturated hydraulic conductivity/Ks*) sering digunakan.

Physical blending: Proses pembuatan (pencampuran secara fisik) pupuk tunggal menjadi pupuk majemuk yang dilakukan secara fisik. Cara ini adalah yang paling fleksibel dimana komposisi pupuk disesuaikan dengan kebutuhan tanaman dan status hara tanah.

Potensi hasil: Kemampuan tanaman berproduksi secara maksimal pada kondisi tanah-air dan tanaman yang optimal.

Potentially utilisable water resource (PUWR). Sumber daya air yang berpotensi dapat dimanfaatkan.

Produktivitas lahan: Kemampuan lahan dalam menghasilkan suatu produksi persatuan luas.

Profil Tanah Sawah: Penampang melintang (*vertical*) tanah sawah yang menunjukkan susunan horizonnya dari permukaan tanah sampai batuan induknya atau sampai kedalaman tertentu.

Profil tanah sawah tipikal: Profil tanah sawah yang susunan horizonnya berturut-turut dari permukaan tanah ke bawah adalah (1) untuk tanah sawah dengan air tanah dalam: lapisan olah – lapisan tapak bajak- horizon iluviasi besi (Bir) – horizon iluviasi Mn (Bmn)-horizon B tanah asal; (2) untuk tanah sawah dengan air tanah agak dangkal atau agak dalam: lapisan olah- lapisan tapak bajak- horizon iluviasi besi (Bir)-horison iluviasi Mn (Bmn)- horizon B tanah asal- horizon iluviasi Mn (Bmn)- horizon iluviasi besi (Bir)- horizon C yang tereduksi (Cg), dengan berbagai variasinya.

Prokariotik: Organisme uniseluler yang tidak memiliki membran inti, terdiri atas subkelompok Eubacteria dan Archaeobacteria.

Pupuk anorganik: Pupuk yang diproduksi dipabrik seperti: pupuk Urea, ZA, SP-36, TSP, KCl, pupuk majemuk N, P, K, dan lain-lain.

Pupuk hayati: Pupuk yang komponen utamanya adalah mikroba tanah yang berguna dalam meningkatkan efisiensi dan ketersediaan hara baik dari pupuk maupun mineral tanah. Salah satu tujuan penggunaan pupuk hayati pada lahan pertanian adalah meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk.

Pupuk majemuk: Pupuk yang kandungan haranya lebih dari satu jenis, seperti berbagai pupuk yang mengandung unsur N,P, dan K.

Pupuk mikroba: Mikroba yang dimanfaatkan sebagai pupuk untuk meningkatkan kesuburan tanah.

Pupuk organik: Pupuk yang sebagian besar atau seluruhnya terdiri bahan organik yang berasal dari sisa tanaman, kotoran hewan atau manusia berbentuk padat atau cair yang telah mengalami dekomposisi.

Pupuk tunggal: Pupuk yang mengandung hara tunggal seperti Urea untuk N, SP-36 untuk P, dan KCl untuk K.

Pemupukan rekomendasi umum nasional: Rekomendasi pupuk untuk komoditas tanaman tertentu yang telah ditetapkan oleh pemerintah dan berlaku secara nasional. Misalnya rekomendasi pemupukan nasional untuk tanaman padi sawah pada masa Bimas adalah 200 kg Urea ha⁻¹, 100 kg SP-36 ha⁻¹, dan 100 kg KCl ha⁻¹.

Rembesan (*seepage*): Komponen kehilangan dalam neraca air melalui bocoran pematang sawah atau tebing saluran irigasi.

Rizosfir: Daerah perakaran dimana jenis, jumlah, atau aktivitas organisme berbeda dengan sebagian besar tanah.

Sawah bukaan baru: Sawah yang baru dibuka dari lahan kering menjadi lahan sawah dan belum terbentuk lapisan tapak bajak.

Sawah intensifikasi: Lahan sawah yang dikelola secara intensif dengan mengaplikasikan teknologi intensifikasi dan memperoleh air irigasi teknis.

Sawah lebak: Sawah yang diusahakan di daerah rawa dengan memanfaatkan naik turunnya permukaan air rawa secara alami, sehingga di dalam sistem sawah lebak tidak dijumpai sistem saluran air.

Sawah pasang surut: Sawah yang irigasinya tergantung pada gerakan pasang dan surut serta letaknya di wilayah datar tidak jauh dari laut. Sumber air sawah pasang surut adalah air tawar sungai yang karena adanya pengaruh pasang dan surut air laut dimanfaatkan untuk mengairi melalui saluran irigasi dan drainase.

Sawah tadah hujan: Sawah yang sumber airnya tergantung atau berasal dari curah hujan tanpa adanya bangunan-bangunan irigasi permanen.

Sedimentasi: Pengangkutan partikel atau agregat tanah yang tererosi bersama aliran air sungai atau saluran air.

Sianobakter: Prokariotik, bakteri fototrofik oksigenik yang mengandung khlorofil *a* dan fikobilin; dahulu (ganggang hijau biru). Ganggang hijau biru bukan ganggang sejati, tetapi termasuk ke dalam kelompok bakteri yaitu Sianobakter.

Simbiosis: Hidup bersama saling membutuhkan dari dua organisme berbeda. Interaksinya dapat saling merugikan atau saling menguntungkan.

Simpanan air (*water storage*): Kadar air tanah pada suatu kedalaman tertentu

Sistem pengelolaan hara terpadu (*Integrated Nutrient Management*): Sistem pengelolaan hara yang mengoptimalkan penggunaan gabungan pupuk anorganik, organik, dan pupuk hayati dalam proses produksinya.

Sodium adsorption ratio (SAR): Adsorpsi Na dalam tanah yang secara matematis dinyatakan sebagai $Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2}$

Soil test kit (perangkat uji tanah): Seperangkat alat dan bahan kimia yang dipergunakan untuk analisis status hara tanah dan rekomendasi pemupukan secara cepat di lapangan.

Status hara tanah: Kondisi ketersediaan hara tertentu pada waktu dan lokasi tertentu.

Tanpa olah tanah (TOT): Tanah tidak diolah untuk persiapan tanam, tetapi biasanya menggunakan herbisida untuk membasmi gulma yang ada di tanah tersebut. Herbisida biasanya diberikan antara 1 atau 2 minggu sebelum tanam padi.

Teknologi ramah lingkungan: Teknologi pengelolaan lahan yang memperhatikan kelestarian lahan pertanian dan lahan sekitarnya dari pencemaran pupuk, insektisida/pestisida dan amelioran agar lahan dapat digunakan secara berkelanjutan.

Titik layu permanen: Batas kadar air di mana tanaman telah menunjukkan gejala layu permanen. Kadar air pada titik layu permanen ditetapkan di laboratorium pada tegangan air (nilai pF) 4.2.

Uji tanah (*soil testing*): Suatu kegiatan analisis kimia yang sederhana, cepat, murah, tepat, dan dapat diulang (*reproduceable*) untuk menduga ketersediaan hara tertentu dalam tanah untuk tanaman tertentu dengan tujuan akhir memberikan rekomendasi pemupukan.

Urea granul: Urea granul adalah salah satu jenis pupuk sumber N dalam bentuk granul (butiran) yang dibuat dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi pemupukan nitrogen (urea tersedia lambat atau *slow release urea*). Bentuk lain dari urea yang dibuat untuk tujuan yang sama adalah urea briket, urea tablet, dan urea *coated* silikat atau sulfur.

Water holding capacity: Kemampuan tanah menahan air.

Zona agroklimat: Pembagian wilayah curah hujan berdasarkan jumlah bulan basah (≥ 200 mm bulan⁻¹) berturut-turut dan jumlah bulan kering (< 100 mm bulan⁻¹) berturut-turut.

1. MORFOLOGI DAN KLASIFIKASI TANAH SAWAH

Sarwono Hardjowigeno, H. Subagyo, dan M. Luthfi Rayes

Tanah sawah adalah tanah yang digunakan untuk bertanam padi sawah, baik terus-menerus sepanjang tahun maupun bergiliran dengan tanaman palawija. Istilah tanah sawah bukan merupakan istilah taksonomi, tetapi merupakan istilah umum seperti halnya tanah hutan, tanah perkebunan, tanah pertanian dan sebagainya. Segala macam jenis tanah dapat disawahkan asalkan air cukup tersedia. Kecuali itu padi sawah juga ditemukan pada berbagai macam iklim yang jauh lebih beragam dibandingkan dengan jenis tanaman lain. Karena itu tidak mengherankan bila sifat tanah sawah sangat beragam sesuai dengan sifat tanah asalnya.

Tanah sawah dapat berasal dari tanah kering yang diairi kemudian disawahkan, atau dari tanah rawa-rawa yang “dikeringkan” dengan membuat saluran-saluran drainase. Sawah yang airnya berasal dari air irigasi disebut sawah irigasi, sedang yang menerima langsung dari air hujan disebut sawah tadah hujan. Di daerah pasang surut ditemukan sawah pasang surut, sedangkan yang dikembangkan di daerah rawa-rawa lebak disebut sawah lebak.

Penggenangan selama pertumbuhan padi dan pengolahan tanah pada tanah kering yang disawahkan, dapat menyebabkan berbagai perubahan sifat tanah, baik sifat morfologi, fisika, kimia, mikrobiologi maupun sifat-sifat lain, sehingga sifat-sifat tanah dapat sangat berbeda dengan sifat-sifat tanah asalnya. Koenigs (1950), orang yang pertama kali melakukan penelitian sifat morfologi tanah sawah sekitar Bogor, mengemukakan adanya profil tanah sawah yang khas, pada tanah kering yang disawahkan di daerah tersebut. Namun demikian, karena perbedaan berbagai faktor yang berpengaruh dalam proses pembentukan tanah sawah, ternyata profil tanah sawah yang khas tersebut tidak selalu dapat terbentuk. Pada tanah rawa

yang disawahkan, atau pada tanah dengan air tanah yang dangkal, tidak terlihat adanya profil tanah yang khas seperti yang dikemukakan oleh Koenigs (1950), meskipun bermacam-macam perubahan sifat tanah akibat penyawahkan telah terjadi. Bahkan pada tanah kering yang disawahkanpun, seperti pada Vertisol dan beberapa jenis tanah lain, tidak semuanya dapat membentuk profil tanah yang khas tersebut.

Penggunaan tanah kering untuk padi sawah dapat menyebabkan perubahan sifat morfologi dan sifat fisiko-kimia tanah secara permanen, sehingga dapat menyebabkan perubahan klasifikasi tanah. Dalam tulisan ini, disajikan uraian tentang beberapa macam sifat morfologi dan profil tanah sawah, serta pengaruhnya dalam klasifikasi tanah, khususnya dalam sistem Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff, 1999; 2003).

MORFOLOGI TANAH SAWAH

Perubahan sifat morfologi tanah.

Sebelum tanah digunakan sebagai tanah sawah, secara alamiah tanah telah mengalami proses pembentukan tanah sesuai dengan faktor-faktor pembentuk tanahnya, sehingga terbentuklah jenis-jenis tanah tertentu yang masing-masing mempunyai sifat morfologi tersendiri. Pada waktu tanah mulai disawahkan dengan cara penggenangan air, baik waktu pengolahan tanah maupun selama pertumbuhan padi, melalui perataan, pembuatan teras, pembuatan pematang, pelumpuran, dan lain-lain, maka proses pembentukan tanah alami yang sedang berjalan tersebut terhenti. Semenjak itu, terjadilah proses pembentukan tanah baru, di mana air genangan di permukaan tanah dan metode pengelolaan tanah yang diterapkan, memegang peranan penting. Karena itu tanah sawah sering dikatakan sebagai tanah buatan manusia (*man-made soil, anthropogenic soil*).

Apabila tanah yang disawahkan tersebut pada awalnya berasal dari tanah

kering, maka akan terjadi perubahan-perubahan sifat morfologi tanah yang cukup jelas, tetapi bila berasal dari tanah basah, maka perubahan-perubahan tersebut umumnya tidak begitu tampak. Kecuali itu, karena penggunaan tanah sebagai sawah umumnya tidak dilakukan sepanjang tahun, tetapi bergiliran dengan tanaman palawija (lahan kering) atau bera, maka perubahan-perubahan tersebut dapat dibedakan menjadi: (1) perubahan sementara dan (2) perubahan permanen.

(1) Perubahan sementara

Perubahan sementara adalah perubahan-perubahan sifat fisik, morfologi dan kimia tanah sebagai akibat penggenangan tanah musiman, baik pada waktu pengolahan tanah maupun selama pertumbuhan padi sawah. Perubahan-perubahan tersebut terjadi di permukaan tanah dan hanya bersifat sementara, karena setelah penyawah selesai dan diganti dengan tanaman palawija atau dibiarkan, terjadi perubahan kembali sifat-sifat tanah tersebut akibat pengeringan tanah. Perubahan sementara sifat fisik dan morfologi tanah sewaktu penyawah, adalah berkaitan dengan pelumpuran/pengolahan tanah dalam keadaan tergenang, sedangkan perubahan-perubahan dalam sifat kimia adalah berkaitan dengan proses reduksi dan oksidasi. Perubahan-perubahan sementara sifat-sifat kimia tanah tersebut secara kumulatif, dapat menyebabkan perubahan yang permanen terhadap sifat morfologi tanah.

(2) Perubahan permanen

Perubahan permanen terjadi akibat efek kumulatif perubahan sementara karena penggenangan tanah musiman, atau praktek pengelolaan tanah sawah seperti pembuatan teras, perataan tanah, pembuatan pematang, dan lain-lain. Perubahan permanen pada tanah yang disawahkan, dapat dilihat pada sifat morfologi profil tanahnya, yang seringkali menjadi sangat berbeda dengan profil tanah asalnya yang tidak disawahkan. Praktek pengolahan tanah sawah dalam keadaan tergenang, dapat menghasilkan terbentuknya lapisan tapak bajak di

bawah lapisan olah. Sedangkan penggenangan tanah selama pertumbuhan padi, dapat mereduksi Fe dan Mn sehingga menjadi larut dan meresap bersama air perkolasi ke lapisan-lapisan bawah, sehingga terbentuk horizon iluviasi Fe di atas horizon iluviasi Mn.

Perubahan sifat-sifat fisik dan kimia tanah yang terus berlangsung tersebut, dicerminkan juga oleh perubahan sifat morfologi tanah, terutama di lapisan permukaan. Dalam keadaan tergenang, tanah menjadi berwarna abu-abu akibat reduksi besi-feri (Fe-III) menjadi besi-fero (Fe-II). Akan tetapi pada tanah pasir atau tanah lain yang permeabel, warna reduksi tersebut tidak terjadi, terkecuali pada penggenangan yang sangat lama. Di lapisan permukaan horizon tereduksi tersebut, dalam keadaan tergenang, ditemukan lapisan tipis yang tetap teroksidasi berwarna kecoklatan, karena difusi O₂ dari udara, atau dari fotosintesis algae.

Bila tanah dikeringkan, akan terjadi oksidasi kembali besi-fero menjadi besi-feri, sehingga terbentuklah karatan coklat pada rekahan-rekahan, bekas-bekas saluran akar, atau tempat-tempat lain di mana udara dapat masuk. Pada tanah pasir, karatan coklat pada bekas-bekas akar tidak terlalu jelas terlihat. Pada tanah masam yang dalam keadaan tergenang mengandung besi-fero tinggi, karatan besi menjadi lebih jelas setelah tanah dikeringkan. Kecuali itu, akibat proses penyawahan yang berulang-ulang terjadi, dapat terbentuk horizon baru yang khas terdapat pada tanah sawah, seperti lapisan tapak bajak, horizon iluviasi Fe, horizon iluviasi Mn, dan lain-lain.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan profil tanah sawah

Tanah sawah merupakan tanah buatan manusia. Karena itu, sifat-sifat tanahnya sangat dipengaruhi oleh perbuatan manusia. Kegiatan manusia yang sangat berpengaruh dalam proses pembentukan profil tanah sawah, antara lain, adalah (1) cara pembuatan sawah dan (2) cara budi daya padi sawah.

(1) Cara pembuatan sawah

Cara pembuatan sawah tergantung dari beberapa hal, antara lain, kondisi relief/topografi dan hidrologi tanah asalnya.

Relief

Bila relief/topografi tanah asal berombak atau berlereng, maka lebih dulu harus dibuat teras bangku. Sawah pada teras, sifatnya sangat berubah dibandingkan dengan tanah asalnya, karena terjadinya penggalian dan penimbunan pada waktu pembuatan teras. Cara pembuatan teras adalah dengan jalan menggali lereng atas, dan menimbun lereng bawah. Akibatnya, susunan horizon tanah asalnya dapat hilang sama sekali. Makin curam lereng, maka teras semakin sempit dan penggalian serta penimbunan semakin dalam. Dalam satu petak sawah yang baru dibuat dengan cara ini, mungkin akan ditemukan lebih dari satu jenis tanah, yaitu Entisol atau Inceptisol pada bagian tanah yang ditimbun atau digali, selain tanah aslinya di bagian tengah petakan. Perubahan sifat tanah selanjutnya, terjadi akibat pelumpuran/pengolahan tanah dalam keadaan tergenang dan penggenangan lapisan olah selama pertumbuhan padi, sehingga terjadi proses pembasahan dari lapisan atas ke lapisan bawah. Lama kelamaan tanah dalam satu petak sawah akan mempunyai sifat morfologi dan sifat-sifat tanah lain, yang mendekati kesamaan terutama pada lapisan atas, atau bila sudah berumur ratusan tahun, pada seluruh solum tanah.

Hidrologi

Pembuatan sawah dari lahan rawa dilakukan dengan membuat saluran-saluran drainase, agar lahan menjadi lebih kering, atau tidak terus-menerus tergenang. Karena itu, sifat tanah akan berubah karena terjadi proses "pengeringan" tanah, mulai dari lapisan atas ke lapisan bawah. Sebaliknya, pada tanah kering yang disawahkan, akan terjadi proses "pembasahan" dari lapisan atas ke lapisan bawah. Apabila tanah rawa yang "dikeringkan" tersebut banyak mengandung bahan sulfidik (pirit, FeS_2), maka profil tanah sawah yang terbentuk banyak mengandung karatan jarosit ($\text{K Fe}_3 (\text{SO}_4)_2 (\text{OH})_6$).

(2) Cara budi daya padi sawah

Pola tanam dan penggenangan

Tanah sawah yang ditanami padi tiga kali setahun, yakni padi-padi-padi, akan tergenang terus-menerus sepanjang tahun. Sawah dengan pergiliran tanaman padi-padi-palawija, setiap tahunnya mengalami masa tergenang yang lebih lama dibandingkan dengan masa kering. Sedangkan sawah dengan pola tanam padi-palawija-bera, mengalami masa tergenang lebih singkat dibandingkan masa keringnya. Akibat adanya perbedaan pola tanam, yang menyebabkan perbedaan lamanya penggenangan tersebut, maka terjadilah perbedaan sifat-sifat morfologi tanah sawah. Sifat-sifat tanah sawah, termasuk sifat morfologinya, juga berubah setiap musim akibat penggunaan tanah yang berbeda. Dalam hal ini, sifat tanah pada saat ditanami padi sawah (basah), berbeda dengan waktu ditanami palawija atau bera. Namun demikian, sawah-sawah yang mempunyai profil tanah yang khas yang telah dikeringkan puluhan tahun, seperti halnya (bekas) tanah sawah di sekitar Bogor, masih menunjukkan adanya lapisan tapak bajak, lapisan Fe, dan lapisan Mn, meskipun lapisan atas tidak lagi berwarna pucat, melainkan kecoklatan mendekati warna tanah asalnya. Sifat-sifat tanah sawah yang *tidak berubah*, baik sewaktu digunakan untuk bertanam padi sawah maupun waktu digunakan untuk bertanam palawija atau bera, disebut *sifat tanah sawah permanen*.

Penambahan lumpur bersama air irigasi

Air pengairan mengandung lumpur yang diendapkan pada petak sawah. Oleh karena itu, selalu ada penambahan lumpur pada lapisan olah. Kualitas dan jumlah lumpur yang diendapkan sangat beragam, tergantung dari sumber lumpur dan banyaknya air. Akibatnya, lapisan olah semakin tebal karena penambahan lumpur tersebut.

Penambahan bahan kimia/unsur hara dengan sengaja dan praktek

pengolahan tanah

Pemberian pupuk, baik pupuk buatan maupun pupuk kandang, kapur dan bahan amelioran lain akan berpengaruh terhadap sifat tanah sawah. Demikian juga praktek pengolahan tanah sawah yang dilakukan dengan cara mencampur dan membalik horizon tanah, pelumpuran, dan pemadatan, dapat mempengaruhi sifat dan perkembangan profil tanah.

Cara budi daya

Pembuatan sawah diawali dengan perataan tanah dan pembuatan pematang. Tanah sawah yang diolah dalam keadaan jenuh air, dengan cara "bajak-garu-bajak-garu" hingga halus, baru kemudian ditanami benih padi, menyebabkan struktur tanah hancur hingga menjadi lumpur yang cocok untuk padi sawah. Tanah sawah yang dilumpurkan, jika kemudian sawah dikeringkan untuk ditanami palawija, akan menjadi masif atau tidak berstruktur, oleh karena itu harus diolah lagi. Penggenangan sedalam 5–10 cm selama 4 – 5 bulan pertanaman padi, menyebabkan terjadinya kondisi reduksi selama jangka waktu tersebut.

Profil tanah sawah dan pembentukannya

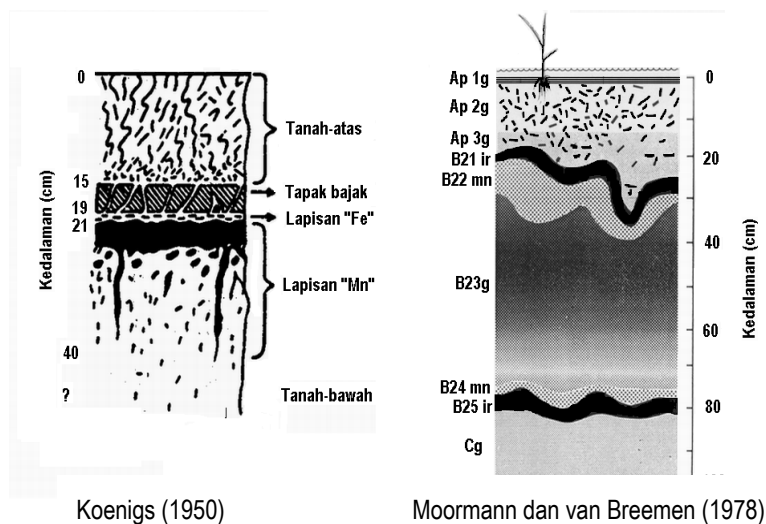
Faktor penting dalam proses pembentukan profil tanah sawah adalah genangan air di permukaan, dan penggenangan serta pengeringan yang bergantian. Proses pembentukan profil tanah sawah meliputi berbagai proses, yaitu (a) proses utama berupa pengaruh kondisi reduksi-oksidasi (redoks) yang bergantian; (b) penambahan dan pemindahan bahan kimia atau partikel tanah; dan (c) perubahan sifat fisik, kimia, dan mikrobiologi tanah, akibat penggenangan pada tanah kering yang disawahkan, atau perbaikan drainase pada tanah rawa yang disawahkan.

Secara lebih rinci, proses pembentukan profil tanah sawah meliputi (a) gleisasi dan eluviasi; (b) pembentukan karatan besi (Fe) dan mangan (Mn); (c)

pembentukan warna kelabu (*grayzation*); (d) pembentukan selaput (*cutan*); (e) penyebaran kembali basa basa; dan (f) akumulasi dan dekomposisi bahan organik.

Profil tanah sawah tipikal

Berdasarkan proses pembentukan tanah seperti telah diuraikan, maka terbentuklah profil tanah sawah dengan sifat morfologi yang berbeda-beda, tergantung dari sifat tanah asalnya. Profil tanah sawah yang tipikal (khas), atau *Aquorizem* (Kanno, 1978), yang terbentuk pada tanah kering dengan air tanah dalam, seperti yang dikemukakan oleh Koenigs (1950), sedikit berbeda dengan profil tanah sawah tipikal dengan air tanah yang agak dangkal (Moormann and van Breemen, 1978) (Gambar 1).



Gambar 1. Profil tanah sawah tipikal menurut Koenigs (1950), serta Moormann dan van Breemen (1978)

Pada tanah kering dengan air tanah dalam yang disawahkan, akan

terbentuk susunan horizon sebagai berikut:

- 1) lapisan olah yang tereduksi dan tercuci (eluviasi) (Ap);
- 2) lapisan tapak bajak (Adg);
- 3) horizon iluviasi Fe (Bir) di atas horizon iluviasi Mn (Bmn), yang sebagian besar teroksidasi;
- 4) horizon tanah asal, yang tidak terpengaruh persawahan (Bw, Bt).
Bila air tanah agak dangkal, maka di bawah horizon tersebut kemudian ditemukan:
- 5) horizon iluviasi (penimbunan) Mn (Bmn) di atas horizon iluviasi Fe (Bir);
- 6) horizon tereduksi permanen (Cg).

Pengamatan di berbagai tempat di Indonesia menunjukkan bahwa lebih banyak tanah sawah yang *tidak* menunjukkan profil tanah yang tipikal tersebut, dibandingkan dengan yang memilikinya. Hal ini disebabkan karena kebanyakan sawah di Indonesia, antara lain, dibuat pada tanah dengan air tanah yang sangat dangkal, atau lahan rawa yang dikeringkan, penyawahannya yang terus-menerus dilakukan sepanjang tahun, tekstur tanah yang terlalu kasar atau terlalu halus, tanah yang mengembang dan mengkerut, dan sebagainya.

Karena banyak tanah sawah di Indonesia terdapat di daerah pelebahan atau dataran aluvial yang terus-menerus tergenang air, baik dari air hujan, luapan sungai maupun air tanah yang dangkal, dan kondisi relief/topografi yang tidak memungkinkan gerakan air ke bawah solum tanah, maka horizon iluviasi Fe dan Mn ataupun lapisan tapak bajak sulit terbentuk. Demikian juga, tekstur tanah yang terlalu kasar atau terlalu halus, atau adanya sifat tanah mengembang dan mengkerut, menghalangi pembentukan horizon-horizon tersebut.

Menurut Kawaguchi dan Kyuma (1977) seperti halnya di Indonesia, profil tanah sawah tipikal (*Aquorizem*) hanya terbentuk, pada lahan kering yang disawahkan yang tidak mengandung mineral liat-2:1. Tanah yang hanya digenangi air pada waktu penyawahannya, dan kemudian dikeringkan untuk tanaman palawija

atau bera pada musim berikutnya, dalam bahasa Jepang disebut "*kander*". Dengan penggunaan tanah seperti itu, profil tanah sawah tipikal di Jepang dapat terbentuk dalam jangka waktu 10–40 tahun. Menurut Kanno (1978), di Jepang juga banyak tanah sawah yang tidak memiliki susunan horizon seperti tanah sawah tipikal tersebut, karena keragaman dalam pengaruh air tanah dan air genangan (hidromorfisme).

Horizon-horizon pada tanah sawah

Beberapa horizon yang terbentuk pada tanah sawah dan proses pembentukannya diuraikan berikut ini. Simbol-simbol horizon yang dicantumkan dalam uraian ini, sebagian, bukan merupakan simbol horizon baku, seperti yang digunakan dalam Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff, 1999; 2003).

Lapisan olah (Apg)

Lapisan olah tanah sawah adalah lapisan tanah teratas yang diolah dalam keadaan basah dan terus-menerus digenangi selama disawahkan, tetapi kering pada waktu tidak disawahkan. Bila tergenang air, lapisan olah dapat dipisahkan menjadi dua bagian yaitu:

- Apg1 – Lapisan tipis teroksidasi (1–2 mm; Kanno, 1978), di permukaan tanah langsung di bawah air genangan. Beberapa penulis menyebutkan tebal lapisan teroksidasi ini, antara 0,5–10 mm, atau 2–20 mm, tergantung dari jumlah O₂ yang terlarut dalam air genangan, kapasitas mereduksi tanah (kadar C-organik tanah), perkolasi air dan aktivitas fauna tanah dan fauna air.
- Apg2 – Lapisan tereduksi di bawah lapisan oksidasi yang disebut "*reversal gley*" (Uchiyama, 1949), "*inverted gley*" (Dudal and Moormann, 1964),

“*surface pseudo gley*” (Tan, 1968). Tingkat gleisasi tergantung lamanya penggenangan dan tekstur tanah. Semakin lama digenangi dan semakin halus tekstur tanah, semakin tinggi gleisasi.

Proses pembentukan tanah utama yang terjadi di dalam lapisan olah adalah proses reduksi (basah) dan oksidasi (kering), serta proses eluviasi dalam keadaan reduksi. Proses reduksi di lapisan olah, dipercepat oleh kandungan bahan organik yang cukup tinggi dari sisa-sisa akar tanaman dan batang padi. Dekomposisi bahan organik dilakukan oleh organisme mikro yang banyak memerlukan oksigen untuk kehidupannya. Karena itu, terjadi kekurangan oksigen, sehingga proses reduksi dipercepat. Dalam kondisi reduksi, Fe dan Mn yang tereduksi (Fe^{2+} , dan Mn^{2+}) menjadi larut, sehingga mudah tercuci dan terjadilah proses eluviasi Fe dan Mn. Sebagian besi-fero yang tidak tercuci di lapisan olah, menyebabkan timbulnya warna abu-abu (*grayzation*). Sebagian besi-fero yang tidak tercuci, teroksidasi pada waktu kering, sehingga menghasilkan karatan coklat-merah.

Pada lapisan olah tersebut, juga terjadi penambahan lumpur dari air irigasi, tetapi menurut Moormann dan Breemen (1978) tidak terjadi proses eluviasi liat dari lapisan ini, meskipun ada gejala penurunan kadar liat. Berkurangnya kandungan liat di horizon ini, diperkirakan karena penghancuran liat oleh proses ferolisis (Brinkman, 1970), yang terjadi akibat penggenangan dan pengeringan yang berganti-ganti. Kecuali itu, berkurangnya liat mungkin juga terjadi karena aliran air genangan berlumpur dari petakan sawah yang lebih tinggi ke petakan yang lebih rendah, sewaktu proses pelumpuran tanah sedang berlangsung.

Sifat fisik tanah lapisan olah terus berubah dari saat pengolahan tanah sampai masa panen, dan keadaan kering berikutnya. Pada waktu persiapan tanah, karena pengolahan tanah dilakukan dengan cara pelumpuran, maka semua agregat tanah hancur, pori-pori mikro meningkat, daya menahan air ikut meningkat tinggi, sehingga mencapai kadar air 90–100%. Karena itu, kohesi

tanah menjadi rendah akibat rendahnya nisbah tanah: air, sehingga tanah menjadi sangat lunak.

Setelah penanaman padi dilakukan, partikel-partikel tanah mulai mengendap dan sebagian air diserap oleh akar tanaman, sehingga kadar air menurun mencapai 20–60% selama pertumbuhan tanaman. Karena itu, daya kohesi tanah meningkat, sehingga tanah menjadi lebih padat. Walaupun demikian, karena tanah masih terus-menerus tergenang, maka tanah masih belum dapat membentuk struktur tanah, dan masih dalam keadaan masif. Pada waktu padi mulai tua, penggenangan mulai dihentikan, sehingga tanah mulai mengering. Dari struktur lumpur, mula-mula tanah berubah menjadi seperti pasta, kemudian memadat, sehingga berstruktur massif. Bila kondisi kering terus berlanjut, tanah akan retak-retak dan terjadi agregasi kembali, sehingga terbentuk struktur gumpal, bila tanah tidak mengandung mineral liat 2:1, atau dapat juga terbentuk struktur tiang atau prismatic, bila tanah banyak mengandung mineral liat 2:1.

Munir (1987), menemukan terjadinya proses ferolisis pada lapisan olah tanah Ultisol yang disawahkan di daerah Kabupaten Lebak, Banten. Pada Ultisol yang tidak disawahkan, selain kaolinit, ditemukan juga sejumlah vermikulit. Sedangkan pada Ultisol yang disawahkan, vermikulit tidak ditemukan kembali, karena telah berubah menjadi vermikulit dengan Al-antar lapisan (*hydroxy-interlayered vermiculite: HIV*) yang mendekati struktur mineral klorit, seperti yang terlihat dari difraktogram sinar X dan pengamatan dengan electron mikroskop. Keadaan ini juga terbukti dari menurunnya kapasitas tukar kation liat, akibat tertutupnya kompleks jerapan oleh lapisan Al-antar lapisan.

Lapisan tapak bajak (Adg)

Lapisan tapak bajak (*plow pan, plow sole, traffic pan*), bukan merupakan horizon genetik tersendiri (Kyuma and Kawaguchi, 1966). Mungkin merupakan sebagian dari horizon A dan sebagian horizon B, atau salah satu dari keduanya, tetapi umumnya lebih mirip dengan horizon A. Horizon ini mempunyai sifat-sifat

sebagai berikut: (a) agak padat, sehingga kerapatan lindak relatif tinggi; (b) pori-pori mikro banyak, dan pori-pori makro serta meso sedikit; (c) kondisi redoks dan pencucian Fe dan Mn tereduksi lebih menyerupai lapisan olah (Apg) di atasnya daripada horizon B dibawahnya, karena itu dianggap sebagai bagian dari horizon A; (d) warna matriks abu-abu seperti horizon Apg, meskipun karatan besi sering ditemukan; (e) telah terjadi pencucian Fe dan Mn; (f) lapisan yang cukup berkembang mempunyai struktur lempeng (Koenigs, 1950); (g) tebal lapisan antara 5–10 cm; dan (h) terbentuk pada kedalaman antara 10–40 cm.

Lapisan tapak bajak (Adg) terbentuk karena hal-hal berikut:

- Pematatan selama pembajakan lapisan olah (di atasnya) dalam keadaan basah, atau pematatan lain oleh tekanan kaki manusia atau binatang, sedangkan lapisan dibawahnya dalam keadaan relatif kering.
- Penghancuran agregat akibat pengolahan tanah dalam keadaan basah, dan akibat tekanan alat-alat pengolahan tanah, menyebabkan lapisan ini lebih padat.
- Pembentukannya dipengaruhi oleh tekstur tanah, dan sifat mengembang-mengkerut tanah. Pada tanah berpasir, tidak terbentuk lapisan tapak bajak, karena kohesi butir-butir pasir rendah sehingga sulit merekat. Pada tanah dengan sifat mengembang-mengkerut karena kandungan mineral liat 2:1 yang tinggi, lapisan tapak bajak juga tidak terbentuk, karena selalu rusak oleh sifat kembang-kerut tersebut (proses pedoturbasi).
- Tanah berlempung halus adalah yang optimal untuk pembentukan lapisan tapak bajak. Sementara, tanah yang mengandung liat terlalu tinggi, lapisan tapak bajak kurang nyata terbentuk.
- Pada tanah dengan air tanah yang sangat dangkal atau selalu tergenang, lapisan tapak bajak juga tidak nyata terbentuk, karena kadar air tanah yang tinggi (basah) di bawah lapisan olah, menyebabkan daya kohesi butir-butir tanah rendah, sehingga sulit merekat satu sama lain.

- Lapisan tapak bajak terbentuk *bukan* karena iluviasi liat, karena terbukti tidak ada peningkatan liat halus dan tidak ditemukan selaput liat (*cutan*) (Moormann and van Breemen, 1978).

Pada tanah sawah bertekstur lempung berpasir, lapisan tapak bajak mulai terbentuk setelah tiga tahun penyawahana pada pengolahan tanah secara mekanis. Sedangkan pada tanah sawah bertekstur liat halus, lapisan tapak bajak terbentuk setelah 10–12 tahun penyawahana. Setelah 50 tahun terlihat jelas, dan setelah 200 tahun, lapisan tapak bajak sudah berkembang dengan baik (Kanno *et al.*, 1964).

Munir (1987), menemukan bahwa penggunaan traktor berat untuk pengolahan tanah sawah, mempercepat pembentukan lapisan tapak bajak. Ia mengemukakan bahwa pada Inceptisol (tanah Aluvial) di Sukamandi, Subang, dapat terbentuk lapisan tapak bajak setebal 20 cm, dalam jangka waktu 20 tahun penggunaan traktor berat (5 t), untuk pengolahan tanah sawah dua kali setiap tahun. Pola perubahan ketebalan lapisan tapak bajak adalah *dari bawah ke atas*, seperti terlihat dari jarak antara permukaan tanah dengan batas bawah lapisan tapak bajak yang selalu tetap, baik yang diolah dengan traktor berat maupun yang diolah dengan traktor tangan. Pengolahan tanah sawah dengan traktor tangan (berat 200 kg), hanya menghasilkan lapisan tapak bajak setebal 2 cm dalam jangka waktu 20 tahun. Pada tanah Vertisol, tidak pernah dapat terbentuk lapisan tapak bajak, meskipun pengolahan tanah dilakukan dengan menggunakan traktor berat. Hal ini terjadi karena kandungan mineral liat 2:1 yang tinggi pada tanah tersebut, sehingga lapisan tapak bajak yang mulai terbentuk selalu menjadi rusak kembali, akibat proses mengembang-mengkerutnya mineral liat tersebut. Grant (1965) mengemukakan bahwa dengan pengolahan tanah sawah secara manual dengan bajak, pada tanah bertekstur sedang, lapisan tapak bajak yang cukup berkembang, dapat terbentuk dalam jangka waktu 200 tahun penyawahana.

Adanya lapisan tapak bajak berpengaruh positif terhadap ketersediaan air untuk tanaman padi, tetapi pada waktu pergiliran dengan tanaman palawija, pengaruh

tersebut menjadi tidak nyata. Bahkan, pada lapisan tapak bajak yang telah berkembang dengan baik, karena sangat padat, lapisan tersebut malah dapat menjadi penghambat perkembangan akar tanaman palawija. Lapisan ini bermanfaat untuk menahan gerakan air perkolasi, sehingga memudahkan terjadinya genangan air di permukaan tanah.

Lapisan paitu (E)

Di Cina dan Jepang sering ditemukan lapisan berwarna pucat, setebal 10–25 cm, terletak di antara lapisan tapak bajak dengan horizon iluviasi dibawahnya, yang disebut “lapisan paitu” (tanah putih). Lapisan ini ditemukan pada tanah sawah dengan pergiliran tanaman dengan gandum. Pembentukannya terjadi karena adanya eluviasi secara kimia dan mekanis, dalam keadaan reduksi dan oksidasi yang berulang-ulang, sehingga menyebabkan: (a) pengurangan hara, Fe dan Mn, secara aktif; (b) pengurangan liat; dan (c) penambahan kadar debu (Hsu, 1962). Di Indonesia, belum ada laporan yang menemukan lapisan tersebut.

Horizon iluviasi-Fe (Bir) di atas iluviasi-Mn (Bmn) yang sebagian besar teroksidasi

Kedua horizon ini dapat terbentuk pada tanah berdrainase baik yang disawahkan, yang kedalaman air tanahnya >1 m. Keduanya ditemukan di bawah lapisan tapak bajak, dan merupakan horizon iluviasi Fe (Bir) dan horizon iluviasi Mn (Bmn), yang sebagian besar telah teroksidasi. Kedua unsur tersebut pada awalnya tercuci (eluviasi) dari lapisan olah (Apg) dalam keadaan tereduksi, ion Fe^{2+} dan Mn^{2+} , yang kemudian diendapkan (iluviasi) di horizon B, yang berada dalam suasana oksidasi. Karena kelarutan Fe^{2+} lebih rendah dari Mn^{2+} , maka Fe akan mengendap lebih dulu, sehingga terbentuklah horizon iluviasi Fe (Bir) di atas horizon iluviasi Mn (Bmn). Horizon iluviasi Fe (Bir) umumnya sangat tipis (<1 cm), sedangkan horizon iluviasi Mn (Bmn) umumnya lebih tebal (Koenigs, 1950; Grant, 1965).

Horizon Bir yang telah berkembang lanjut, dapat mengeras menjadi padas

besi tipis, yang disebut horizon "plakik" (*placic horizon*). Di bawah Bmn, sering ditemukan horizon Bir-mn atau Bmn-ir, dimana iluviasi Fe dan Mn tidak jelas terpisahkan. Akibat iluviasi Fe dan Mn tersebut, dapat terbentuk struktur tanah majemuk, prismatik, atau gumpal bersudut, dengan selaput Fe atau Mn pada bidang-bidang strukturnya.

Horizon B (Bw, Bt) tanah asal

Pada tanah-tanah dengan air tanah dalam yang disawahkan, horizon-horizon tanah asli di bawah horizon iluviasi Fe dan Mn, umumnya tidak terpengaruh oleh resapan air genangan di permukaan akibat penyawahkan. Karena itu, tidak terlihat adanya perubahan sifat-sifat tanah akibat penyawahkan. Horizon-horizon tersebut tetap mempertahankan sifat-sifat tanah asalnya.

Horizon iluviasi-Mn (Bmn) di atas iluviasi-Fe (Bir) yang sebagian besar tereduksi

Pada tanah sawah dengan air tanah yang relatif dangkal, terbentuk horizon iluviasi Fe dan iluviasi Mn di atas garis permukaan air tanah, akibat naik turunnya permukaan air tanah sesuai dengan musim. Pada waktu permukaan air tanah naik ke lapisan yang lebih oksidatif di atasnya, maka Fe^{2+} dan Mn^{2+} juga ikut terbawa, dan karena Fe lebih sukar larut daripada Mn, maka Fe akan mengendap lebih dulu. Akibatnya, terbentuklah horizon Bir di bawah horizon Bmn (Moorman and van Breemen, 1978). Kedua horizon ini kadang dapat terpisah dengan jelas, tetapi kadang-kadang juga tidak jelas terpisah.

Horizon tereduksi permanen (Cg)

Horizon ini terdapat pada tanah sawah dengan air tanah dangkal atau agak dangkal. Karena terus-menerus tergenang oleh air tanah, maka seluruh horizon tanah ini dalam keadaan reduksi. Genangan air di permukaan tanah sawah tidak banyak berpengaruh pada horizon ini, karena pengaruh genangan air tanah yang sudah berlangsung sejak awal proses pembentukan tanah, secara alamiah telah

berlangsung sangat kuat.

Profil tanah sawah berpasir

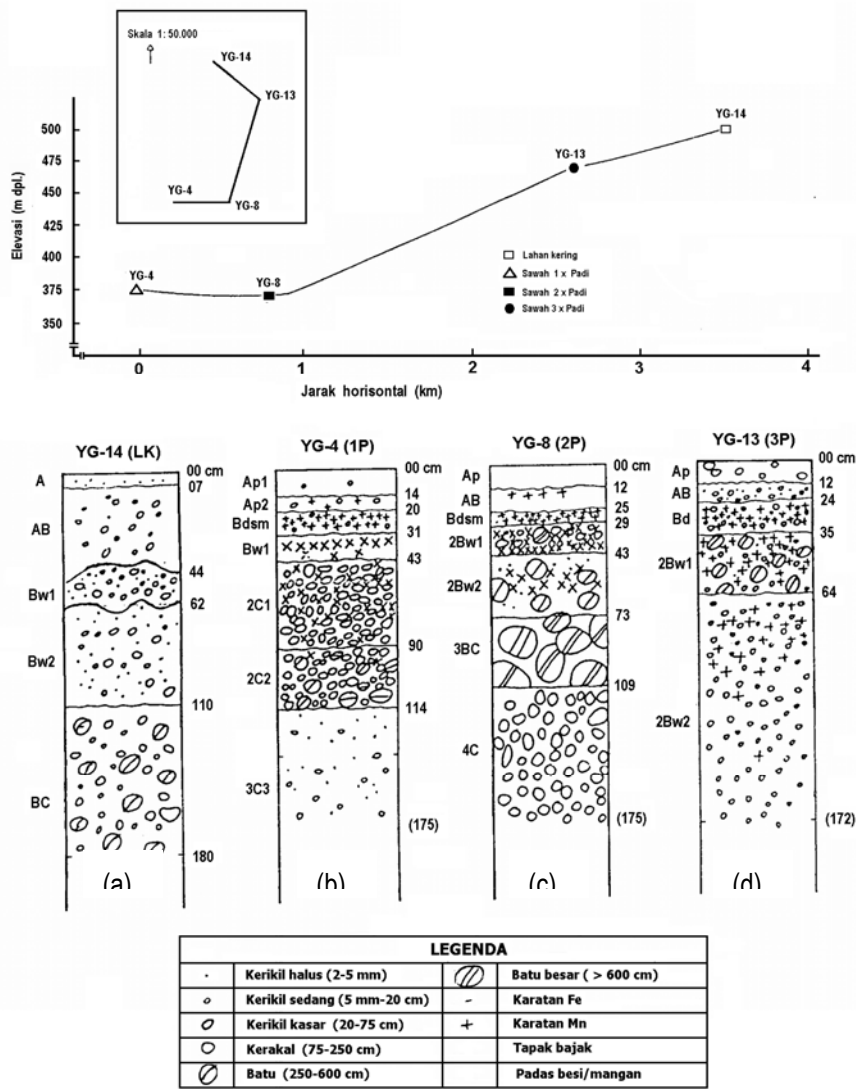
Dalam penelitiannya terhadap tanah-tanah sawah berpasir yang berasal dari lahar Gunung Merapi di Yogyakarta, Rayes (2000) mengemukakan bahwa terdapat perbedaan sifat morfologi yang jelas, terutama pada 60 cm teratas profil tanah, antara tanah yang disawahkan (Gambar 2 b,c,d; 3 b,c,d; 4 b,c,d) dengan tanah serupa yang tidak disawahkan (Gambar 2a; 3a; 4a). Moormann and van Breemen (1978), mengemukakan bahwa lapisan tapak bajak tidak terbentuk pada tanah sawah berpasir. Namun, penelitian Rayes (2000) menunjukkan bahwa pada tanah sawah berpasir yang ditanami padi tiga kali setahun (Gambar 2d; 3d; 4d), dijumpai lapisan tapak bajak (Ad dan Bd) setebal 4–11 cm, pada kedalaman 15–27 cm dari permukaan tanah. Pada tanah sawah yang ditanami padi satu dan dua kali setahun, lapisan tapak bajak berkembang menjadi lapisan padas besi/mangan (Bdsm) seperti terlihat pada Gambar 2b,c; 3b,c dan 4b,c.

Padas besi yang terbentuk menyerupai sifat fragipan, yaitu mengeras dalam keadaan kering, tetapi hancur bila direndam air. Walaupun demikian, padas besi pada pedon-pedon yang diteliti, tidak dapat digolongkan sebagai fragipan, karena tebalnya umumnya <15 cm, dan ditemukan akar-akar tanaman pada jarak lateral <10 cm. Pada semua profil tanah yang diamati, konsentrasi karatan Fe selalu berada di atas karatan Mn.

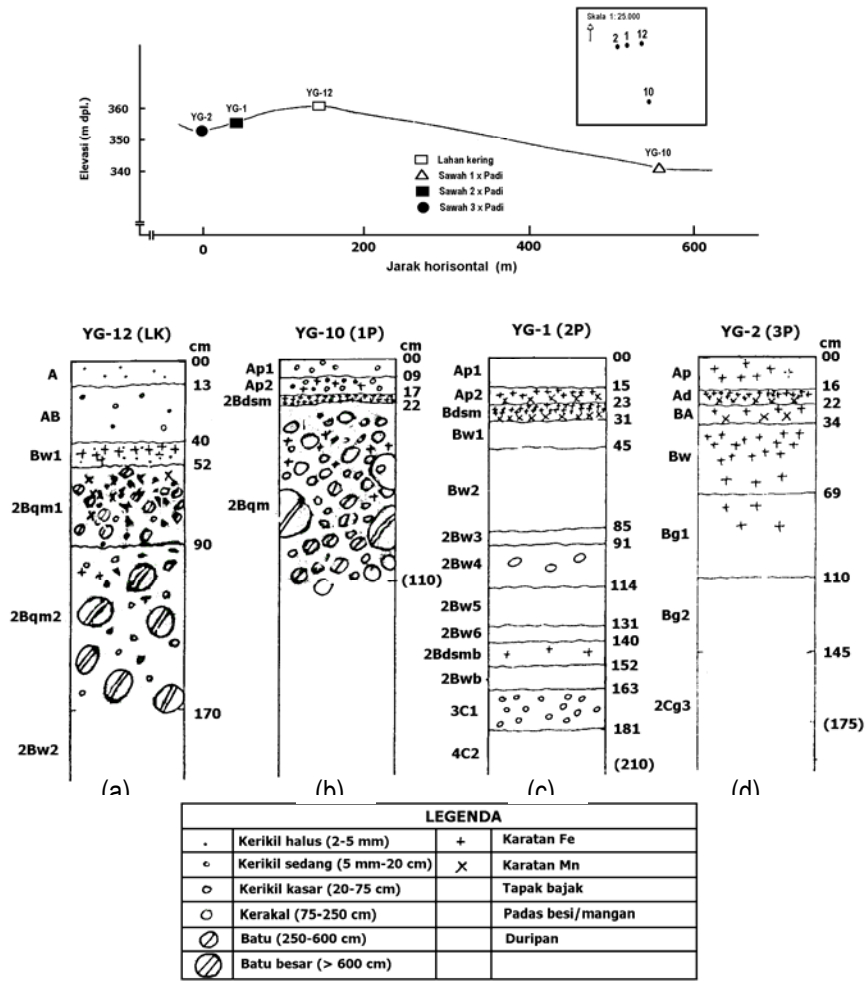
Kecuali itu, pada tanah sawah dengan tanaman padi satu kali pertahun (1P), yang berarti semakin lama periode kering, lapisan besi/mangan (Bdsm) ditemukan, semakin tebal dan semakin dangkal (Gambar 2b, 3b, dan 4b). Demikian juga, semakin halus tekstur tanah, lapisan padas besi/mangan (Bdsm) juga semakin dangkal dan semakin tebal (Gambar 4b,d; bandingkan dengan Gambar 3b,d dan Gambar 2b,d). Sedangkan pada tanah sawah dengan dua kali padi pertahun (2P), semakin halus tekstur tanah, lapisan padas besi/mangan terlihat semakin dalam dan semakin tebal (Gambar 4c; bandingkan dengan Gambar 3c; 2c).

Terbentuknya lapisan tapak bajak, atau lapisan padas besi/mangan, pada tanah sawah berpasir di daerah lahar ini, berhubungan erat dengan kandungan

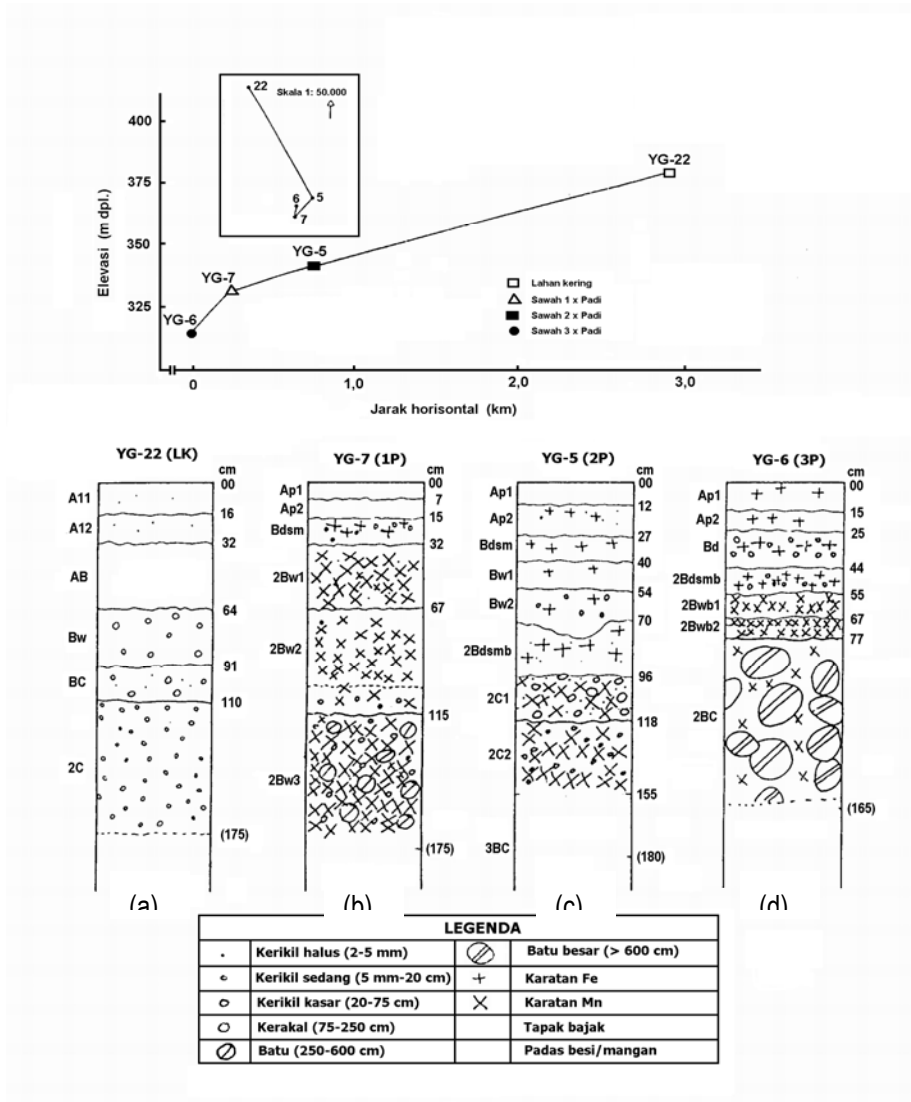
silika-amorf yang tinggi dalam air dan larutan tanah. Kandungan Si-amorf yang tinggi juga menyebabkan terbentuknya duripan (Bqm) di berbagai tempat, tetapi pembentukannya tidak disebabkan oleh penyawahhan (Gambar 3a,b). Dengan perkataan lain, duripan dapat terbentuk, baik pada tanah kering maupun pada tanah yang disawahkan. Selain itu, penyawahhan pada tanah berpasir tidak menyebabkan terjadinya gleisasi yang kuat, sehingga tidak ditemukan tanah dengan kroma rendah (kroma <2; value >4), dan menunjukkan reaksi negatif dengan a,a' dipridil.



Gambar 2. Profil tanah sawah dengan tekstur pasir berkerikil (Rayes, 2000)



Gambar 3. Profil tanah sawah dengan tekstur pasir (Rayes, 2000)



Gambar 4. Profil tanah sawah dengan tekstur lempung berpasir (Rayes, 2000)

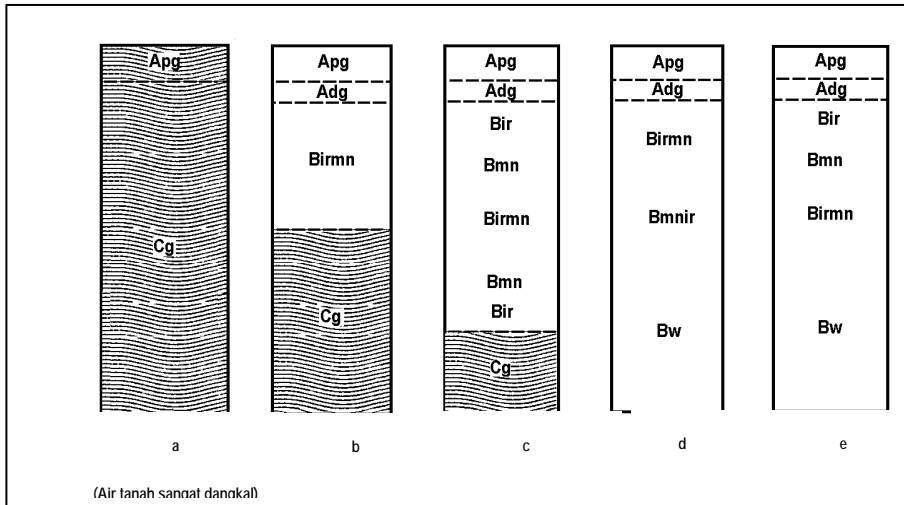
Pengaruh kedalaman air tanah terhadap pembentukan profil tanah sawah

Dari uraian di atas, dapat difahami bahwa profil tanah sawah tipikal hanya terbentuk pada tanah dengan air tanah dalam, atau agak dalam. Pada tanah dengan air tanah sangat dangkal atau terus-menerus tergenang, susunan horizon dalam profil tanah seperti diuraikan di atas tidak dapat terbentuk. Mungkin sekali hal ini terjadi, karena pengaruh air tanah yang terlalu kuat sampai ke permukaan tanah, sehingga tidak terjadi resapan air dari permukaan ke lapisan bawah. Mungkin juga hal ini disebabkan, karena pengaruh yang *sama* kuat, antara air genangan sawah (air irigasi) dan air tanah, sehingga Fe dan Mn yang dibawa dari permukaan tanah oleh resapan air genangan, tercampur dengan Fe dan Mn yang dibawa dari lapisan bawah oleh gerakan air kapiler dari air tanah.

Kanno (1956) membedakan tanah sawah, berdasarkan atas kedalaman air tanahnya sebagai berikut:

1. Tanah sawah dengan air tanah dangkal atau tergenang, disebut "Tanah sawah glei air tanah" (*Ground water gley rice soils*).
2. Tanah sawah dengan kedalaman air tanah sedang, disebut "Tanah sawah mirip glei peralihan" (*Intermediate gley-like rice soils*).
3. Tanah sawah dengan air tanah dalam, disebut "Tanah sawah mirip glei air permukaan" (*Surface water gley-like rice soils*).

Beberapa ragam profil tanah sawah yang terbentuk pada tanah, dengan kedalaman air tanah yang berbeda disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Profil tanah sawah dengan kedalaman air tanah yang berbeda

Pada tanah sawah dengan kedalaman air tanah yang sangat dangkal atau tergenang (Gambar 5.a), seluruh profil tanah terus-menerus tergenang air, atau hanya sebagian kecil lapisan permukaan yang kadang-kadang tidak jenuh air. Karena itu, pada tanah ini hanya ditemukan horizon Apg dan Cg, sedangkan lapisan tapak bajak (Adg), horizon iluviasi Fe (Bir) dan Mn (Bmn) tidak ditemukan. Lapisan tapak bajak tidak dapat terbentuk, karena kadar air tanah di bawah lapisan olah terlalu tinggi, sehingga daya kohesi butir-butir tanah sangat rendah, sehingga tidak dapat merekat satu sama lain. Horizon iluviasi Fe dan Mn juga tidak dapat terbentuk, karena walaupun banyak Fe dan Mn tereduksi yang larut dalam air, tetapi resapan air ke lapisan bawah sangat sedikit, dan tidak ada lapisan tanah oksidatif di bawah lapisan olah. Karatan Fe dan Mn sering ditemukan di lapisan olah, yang kadang-kadang tidak jenuh air.

Pada tanah sawah dengan air tanah dangkal (Gambar 5.b), pengaruh air genangan akibat penyawahan dan pengaruh air tanah kadang-kadang saling bertautan, atau hanya sedikit terpisahkan. Pada pedon ini, horizon iluviasi Fe dan Mn yang berasal dari pengaruh air genangan, bercampur dengan horizon iluviasi

Fe dan Mn akibat pengaruh dari air tanah. Akibatnya, tidak terjadi pemisahan antara Bir dan Bmn, sehingga terbentuk horizon Bir-Mn.

Pada tanah sawah dengan air tanah yang agak dalam atau agak dangkal (Gambar 5.c), pemisahan tersebut masih dapat terjadi, sehingga dapat terbentuk profil tanah tipikal, mirip seperti yang dikemukakan oleh Moormann dan van Breemen (1978).

Pada tanah sawah dengan air tanah dalam (Gambar 5.d,e), pengaruh air genangan di permukaan tanah sangat kuat, sedang pengaruh air tanah terhadap pembentukan profil tanah tidak terlihat. Dalam keadaan seperti ini, profil tanah tipikal seperti yang dikemukakan Koenigs (1950) dapat terbentuk. Walaupun demikian, profil tanah tipikal tersebut tidak selalu dapat terbentuk karena berbagai hal, misalnya tekstur tanah yang terlalu kasar atau terlalu halus, permeabilitas tanah yang terlalu lambat, ditemukannya kandungan mineral liat 2:1 yang cukup tinggi di dalam tanah, dan sebagainya.

Pengaruh permeabilitas tanah terhadap profil tanah sawah

Mitsuchi (1975) mengemukakan bahwa kenampakan profil tanah sawah dapat berbeda-beda, akibat perbedaan pada permeabilitas tanah yang disawahkan, yang mungkin terjadi karena perbedaan tekstur tanah, atau perbedaan sebaran pori-pori tanah. Ia meneliti profil-profil tanah sawah yang berasal dari tanah yang berdrainase baik (*well-drained*) dengan air tanah dalam, tetapi mempunyai permeabilitas tanah yang berbeda, yaitu baik, lambat, dan sangat lambat. Berdasarkan perbedaan permeabilitas tanah tersebut, ia mengemukakan adanya tiga jenis tanah sawah yaitu:

1. Tanah sawah coklat (*Brown lowland paddy soils*)
2. Tanah sawah kelabu (*Gray lowland paddy soils*)
3. Tanah sawah glei (*Hanging-water Gley lowland paddy soils*)

Tanah sawah coklat, adalah tanah sawah yang berasal dari tanah yang

mempunyai permeabilitas tanah baik. Dari tanah seperti ini, menurut Mitsuchi (1975), dapat terbentuk profil tanah sawah tipikal seperti yang dikemukakan Koenigs (1950), yang mempunyai susunan horizon berturut-turut dari lapisan atas: Apg (lapisan olah) – Adg (lapisan tapak bajak) – Bir (iluviasi Fe) - Bmn (iluviasi Mn)– Bw (horizon kambik).

Tanah sawah kelabu, adalah tanah sawah yang berasal dari tanah dengan permeabilitas lambat. Pada tanah ini, lapisan tapak bajak tidak terbentuk, karena dengan permeabilitas tanah yang lambat, lapisan tanah di bawah lapisan olah mempunyai kandungan air yang tinggi, sehingga nisbah tanah terhadap air menjadi rendah, dan menyebabkan daya kohesi butir-butir tanah rendah. Walaupun demikian, horizon iluviasi Fe cukup jelas terlihat, sedangkan horizon iluviasi Mn agak tersebar di bawahnya. Sebagian Fe dan Mn hilang dari horizon bawah, tetapi tambahan Fe dan Mn dari lapisan atas lebih banyak, sehingga terbentuklah horizon iluviasi Fe-Mn.

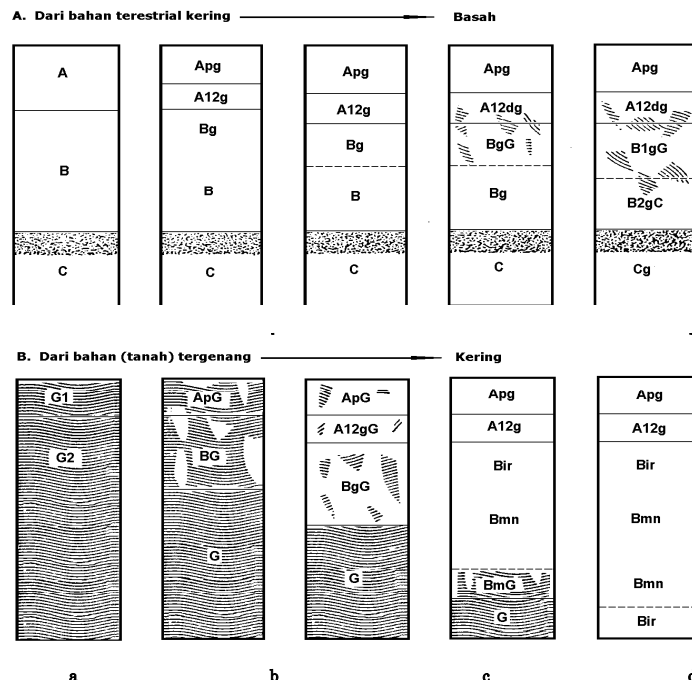
Tanah sawah glei, adalah tanah sawah yang berasal dari tanah dengan permeabilitas sangat lambat, sehingga terbentuk tanah dengan warna glei, karena adanya genangan air terus-menerus, akibat sangat lambatnya permeabilitas tanah. Hal ini dapat terjadi, misalnya karena tingginya kandungan liat yang mudah mengembang, dan hampir sepanjang tahun tanah digunakan untuk tanaman padi. Di horizon bawah, warna tanah masih lebih terang daripada horizon atas. Lapisan tapak bajak tidak terbentuk, tetapi eluviasi lemah Fe dan Mn terjadi pada horizon glei di permukaan, dan horizon iluviasi lemah Fe dan Mn ditemukan di horizon bawah.

Perbedaan perkembangan profil tanah sawah berasal dari lahan kering dan lahan basah

Kanno (1978) menggambarkan pola perkembangan profil tanah sawah, yang berasal dari dua bahan berbeda, yaitu dari tanah kering dan tanah yang

tergenang (tanah rawa) (Gambar 6).

Pada tanah yang berasal dari bahan terestrial kering, tanah yang semula kering, mulai mengalami pembasahan dari permukaan tanah, diikuti dengan pembentukan lapisan tapak bajak dan karatan (Gambar 6A). Jika tidak ada lapisan kedap air (*impervious layer*) pada kedalaman <150 cm dari permukaan tanah, maka tidak akan terbentuk horizon yang mengalami gleisasi yang sangat kuat (G), tetapi masih dapat terbentuk horizon Bg atau Cg. Pada tanah dengan permeabilitas baik, dapat terbentuk profil tanah tipikal. Reduksi terjadi pada lapisan olah dan lapisan tapak bajak, sedangkan lapisan dibawahnya masih bersifat oksidatif. Pada tanah dengan permeabilitas lambat atau sangat lambat, reduksi dapat mencapai lapisan bawah tanah, karena air sangat lambat hilang dari tanah. Selain pengaruh air genangan yang makin meningkat ke lapisan yang lebih bawah dengan makin lamanya penyawahan, perubahan lahan kering menjadi lahan sawah seperti telah diuraikan terdahulu, juga dapat menghasilkan horizon/lapisan khusus seperti lapisan tapak bajak, Bir Bmn, dan lain-lain sehingga dapat terbentuk profil tanah sawah tipikal (Gambar 1) atau bentuk profil tanah sawah yang lain seperti disajikan pada Gambar 2, 3, 4 dan Gambar 5,b-e.



Gambar 6. Skema perkembangan profil tanah sawah, masing-masing berasal dari tanah terestrial kering dan tanah tergenang (basah) (Kanno, 1978)

Sebaliknya, pada tanah yang semula tergenang secara terus-menerus (tanah rawa), jika disawahkan melalui perbaikan drainase, maka lapisan/horizon atas akan mengalami pengeringan lebih dulu, diikuti dengan horizon-horizon dibawahnya (Gambar 6B). Horizon yang pada mulanya tereduksi kuat (G), berangsur-angsur berubah menjadi ApG dan kemudian Apg, serta dibawahnya terbentuk A12g, dan diikuti dengan perkembangan horizon Bir dan Bmn.

Kanno *et al.* (1964) mengemukakan perkembangan profil tanah sawah berasal dari lahan basah dengan perbaikan drainase, sebagai berikut:

- Lapisan tapak bajak belum terbentuk pada saat awal perbaikan drainase, dan baru mulai terbentuk setelah perbaikan drainase cukup lanjut, yaitu pada waktu terjadi pemisahan Bir dan Bmn di atas horizon Bg. Pemisahan Bir dan Bmn umumnya terlihat kurang jelas.
- Dengan berlanjutnya perbaikan drainase, maka terbentuklah horizon Bg dari horizon G, dan semua becak-becak glei akan hilang.

Pengamatan penulis terhadap tanah-tanah sawah yang berasal dari lahan basah di Indonesia, pada umumnya menunjukkan bahwa lapisan tapak bajak, horizon-horizon Bir dan Bmn tidak dapat terbentuk dengan baik sehingga profil tanah sawah seperti yang disajikan pada Gambar 6,d-e, yang mempunyai profil tanah sawah tipikal tidak terbentuk. Dalam kenyataannya banyak profil tanah sawah berasal dari lahan basah yang tidak atau hanya sedikit mengalami perubahan dari profil tanah asalnya seperti terlihat pada Gambar 6, b-c. Hal ini karena "pengeringan" lahan basah untuk sawah tidak dilakukan secara intensif sehingga genangan air masih terus terjadi, lebih-lebih untuk daerah yang digunakan untuk bertanam padi sawah 2-3 kali/tahun.

KLASIFIKASI TANAH SAWAH

Klasifikasi tanah sawah yang telah disebutkan pada berbagai uraian tulisan ini terlihat tidak sistematis, karena sebagian besar hanya didasarkan pada proses pembentukannya, yaitu pengaruh manusia dan pengaruh air genangan di permukaan tanah, dan bukan atas dasar sifat-sifat tanah yang telah dihasilkan secara permanen, sebagai akibat penyawahan. Dari pengamatan di lapangan dan penelitian lain di berbagai daerah di Indonesia, terlihat bahwa meskipun tanah sawah semuanya terjadi karena pengaruh perbuatan manusia, dan selalu mendapat genangan air di permukaan, tetapi sifat-sifat morfologi dan sifat-sifat lain yang dihasilkan berbeda-beda tergantung dari sifat tanah asalnya.

Tanah sawah mempunyai beberapa nama dalam sistem klasifikasi tanah secara umum yaitu: "*Rice soils*", "*Paddy soils*", "*Lowland paddy soils*", "*Artificial hydromorphic soils*", dan "*Aquorizem*".

Dalam klasifikasi tanah FAO (*World Reference Base for Soil Resources*) tanah sawah termasuk grup tanah "*Anthrosols*" (FAO, 1998). Tanah sawah dicirikan oleh horizon "*anthraquic*", yaitu adanya lapisan olah dan lapisan tapak bajak.

Dalam Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff, 1996; 1999; 2003), tidak terdapat klasifikasi (nama) untuk tanah sawah, pada tiga kategori tertinggi yaitu pada tingkat ordo, subordo, maupun *great group*. Sifat-sifat khas tanah sawah baru muncul pada Taksonomi Tanah tahun 1992 (Soil Survey Staff, 1992), berdasarkan rekomendasi dari ICOMAQ (*International committee on aquatic soil moisture regime*) yang mengusulkan adanya "saturasi antrik", dan "kondisi anthrakuik", untuk mewadahi sifat-sifat khas tanah sawah, akibat pelumpuran dan penggenangan terus-menerus selama pertumbuhan tanaman padi sawah.

Dalam dua edisi Taksonomi Tanah yang terakhir (Soil Survey Staff, 1999; 2003), klasifikasi (nama) tanah sawah ditempatkan pada tingkat subgrup, dengan menggunakan awalan "*anthraquic*", untuk mencerminkan adanya "kondisi anthrakuik" pada tanah sawah. Terdapat *sebelas* subgrup "*anthraquic*", yaitu masing-masing dua subgrup pada ordo Alfisol, Andisol, Entisol, Inceptisol, dan Ultisol, serta satu subgrup pada ordo Mollisol.

Masing-masing subgrup tersebut adalah pada Alfisol (*Anthraquic Hapludalf* dan *Anthraquic Paleudalf*), Andisol (*Anthraquic Hapludand* dan *Anthraquic Melanudand*); Entisol (*Anthraquic Ustifluvent* dan *Anthraquic Ustorthent*); Inceptisol (*Anthraquic Eutrudept* dan *Anthraquic Haplustept*), Ultisol (*Anthraquic Kanhaplohumult* dan *Anthraquic Paleudult*), dan Mollisol (*Anthraquic Haplustoll*);

Klasifikasi tanah sawah Indonesia

Klasifikasi tanah sawah sangat ditentukan oleh klasifikasi tanah asalnya, sebelum tanah disawahkan. Karena tanah sawah dapat berasal dari berbagai macam jenis tanah, maka menurut Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff, 1999; 2003) pada kategori yang paling kasarpun, yaitu kategori ordo, tanah sawah sudah mempunyai nama yang berbeda-beda. Banyak tanah sawah di Indonesia yang klasifikasi tanahnya tidak mengalami perubahan, meskipun tanahnya telah digunakan untuk bertanam padi selama puluhan tahun. Hal ini terjadi karena penyawahkan, tidak menghasilkan horizon penciri atau sifat penciri baru, yang dapat merubah klasifikasi tanah lama ke klasifikasi tanah yang baru. Keadaan seperti ini umumnya ditemukan pada tanah dengan air tanah yang sangat dangkal atau tergenang, yang disawahkan.

Pada tanah sawah yang berasal dari lahan kering, perubahan klasifikasi tanah pada kategori tertentu, lebih mungkin dapat terjadi. Hal ini disebabkan karena penggenangan tanah kering di permukaan, dan metode pengelolaan tanah sawah lain yang dilakukan bertahun-tahun, mampu menghasilkan perubahan sifat morfologi dan sifat-sifat lain secara permanen, meskipun sebagian terbatas di bagian permukaan profil tanah. Perubahan yang menghasilkan sifat morfologi dan sifat-sifat lain yang permanen dalam suatu pedon, menghasilkan horizon penciri atau sifat penciri baru, yang pada kategori klasifikasi tertentu, dapat merubah klasifikasi tanah asal ke dalam klasifikasi tanah baru.

Berdasarkan data yang dikemukakan oleh Soepraptohardjo dan Suhardjo (1978), diperkirakan bahwa sekitar 70% tanah sawah di dataran rendah di Indonesia termasuk dalam ordo Inceptisol, Entisol, dan Vertisol (sepadan dengan: Aluvial, tanah Glei, Regosol, dan Grumusol). Sekitar 22% merupakan pesawahan "*uplands*" di daerah vulkan, yang termasuk dalam ordo Ultisol, Inceptisol, Andisol, dan Alfisol (Latosol, Regosol, Andosol, dan Mediteran). Sedangkan sekitar 6% merupakan pesawahan pada tanah-tanah masam, yang termasuk dalam ordo Ultisol dan Oxisol (Podsolik Merah Kuning).

Tanah sawah di dataran rendah, di dominasi (55%) oleh subordo Aquept dan Aquent (Aluvial dan Tanah Glei), sedangkan tanah sawah di daerah "*uplands*" didominasi (17%) oleh subordo Udept (Latosol dan Regosol). Tanah-tanah sawah yang termasuk ke dalam subordo Aquept dan Aquent, umumnya berasal dari tanah dengan air tanah yang sangat dangkal atau selalu tergenang air, khususnya di daerah pelebahan atau lahan rawa. Sedangkan yang termasuk Udept, umumnya berasal dari tanah kering yang disawahkan.

Ordo tanah sawah lain yang cukup luas, adalah Vertisol (Grumusol), sekitar 7%, yang terutama mencakup subordo Aquert, Udert, dan Ustert; Ultisol dan Oxisol (Podsolik Merah Kuning), sekitar 6%, dengan subordo utama Aquult dan Paleudult, serta Aquox dan Kandiudox; Alfisol (Mediteran Merah Kuning),

sekitar 4%, terutama subordo Aqualfs, Udalf, dan Ustalf; Andisol (Andosol), sekitar 1%, yang utamanya masuk subordo Udand, Ustand, dan Aquand. Beberapa tanah sawah bukaan baru di daerah “*uplands*” di luar Jawa, umumnya termasuk dalam ordo Ultisol dan Oxisol (Podsolik Merah Kuning, Lateritik, Latosol). Tanah sawah yang termasuk Oxisol jumlahnya masih sangat sedikit, diperkirakan <1% dari seluruh tanah sawah yang ada.

Perubahan sifat morfologi tanah yang mempengaruhi klasifikasi tanah

Penggunaan tanah untuk padi sawah dapat menyebabkan perubahan permanen sifat morfologi dan sifat fisiko-kimia tanah asal, yang selanjutnya dapat menyebabkan perubahan klasifikasi tanah. Perubahan-perubahan tersebut disebabkan oleh cara budi daya padi sawah, seperti pelumpuran lapisan olah dan penggenangan selama pertumbuhan padi, atau akibat cara pembuatan sawah, seperti pembuatan teras, pembuatan saluran drainase pada tanah rawa, dan sebagainya. Namun demikian, kadang-kadang perubahan tersebut hanya sedikit terlihat dan umumnya hanya terbatas pada horizon permukaan. Perubahan tersebut kadang-kadang juga hanya bersifat sementara, dalam arti, terbatas hanya pada waktu sedang disawahkan.

Sementara bila digunakan lagi untuk pertanian lahan kering (palawija), sifat tanah berubah kembali mendekati ke sifat tanah asalnya. Pada Vertisol, perubahan kembali ke sifat tanah asal lebih jelas terlihat. Setelah satu siklus pergiliran tanaman, padi-palawija-padi, terjadi proses pedoturbasi, yaitu proses perubahan kembali ke sifat tanah asal karena sifat-sifat tanahnya sendiri, yang dalam hal ini sifat mengembang-mengkerut.

Berkaitan dengan hal-hal tersebut, maka perubahan sifat morfologi tanah akibat penyawahkan, secara taksonomi sering dianggap tidak terlalu penting dan tidak dapat dicerminkan dalam klasifikasi tanah (Dudal and Moormann, 1964;

Wada, 1966). Walaupun demikian, perubahan yang permanen yang penting untuk klasifikasi tanah dapat juga terjadi, sebagai akibat efek kumulatif dari perubahan-perubahan musiman atau berbagai praktek pengelolaan tanah sawah. Perubahan sifat-sifat morfologi tanah yang berpengaruh terhadap klasifikasi tanah meliputi: (1) perubahan rejim kelembapan tanah; (2) perubahan karena pembuatan teras; (3) perubahan karena terbentuknya horizon tambahan; dan (4) perubahan karena terbentuknya horizon albik.

(1) Perubahan rejim kelembapan tanah

Karena tanah sawah terus-menerus digenangi air selama pertumbuhan tanaman padi, maka secara umum telah terjadi perubahan rejim kelembapan tanah, dari rejim ustik menjadi udik, atau dari udik menjadi rejim akuik. Selain itu, pada tanah sawah, akibat pelumpuran lapisan olah dan penggenangan secara terus-menerus, tercipta kondisi akuik yang secara khusus disebut “kondisi anthrakuik” (*anthraquic condition*). Kondisi anthrakuik adalah kondisi akuik yang khusus, yang terjadi karena tanah ditanami dan digenangi (irigasi) secara sengaja oleh manusia.

Tanah dengan “kondisi anthrakuik” harus memenuhi syarat kondisi akuik, dan juga memenuhi kedua persyaratan berikut (Soil Survey Staff, 1996):

- a. Di bawah lapisan atas yang diolah, langsung ditemukan lapisan dengan permeabilitas lambat, yang selama tiga bulan atau lebih pertahun, harus:
 - (1) Jenuh air dan tereduksi; dan
 - (2) Kroma pada matriks harus, 2 atau kurang; dan
- b. Horizon bawah memiliki satu atau lebih, hal-hal berikut:
 - (1) Deplesi redoks dengan warna value (lembap) empat atau lebih, dan kroma 2 atau kurang; atau
 - (2) Konsentrasi redoks dari besi; atau

- (3) Mengandung Fe (ekstraksi sitrat ditionit) dua kali lebih banyak atau lebih, dibandingkan dengan lapisan olah.

Dalam edisi terakhir Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff, 1999; 2003), kondisi anthrakuik termasuk sebagai sifat penciri untuk tanah mineral dan tanah organik, dan didefinisikan secara lengkap sebagai “saturasi anthrik”, yaitu salah satu dari tiga tipe penjenuhan/saturasi, selain “endosaturasi”, dan “episaturasi”. Sedangkan “kondisi anthrakuik” dianggap merupakan “variant” dari episaturasi, yang berkaitan dengan penggenangan terus-menerus pada budi daya padi sawah.

Pada edisi Taksonomi Tanah terdahulu, kondisi anthrakuik mencerminkan kandungan P yang tinggi, tetapi pada edisi-edisi terakhir, kandungan P tinggi bukan merupakan persyaratan lagi. Perlu juga dicatat bahwa kondisi akuik yang diperhitungkan dalam Taksonomi Tanah, adalah kondisi akuik yang telah dapat menghasilkan warna tanah dengan kroma rendah (kroma <2, dan value >4), baik pada seluruh tanah, atau berupa becak-becak, maupun ditemukannya besi-fero aktif, yang bereaksi positif dengan larutan alfa, alfa-dipiridil.

Berdasarkan besarnya perubahan rejim kelembapan tanah tersebut, maka tanah sawah dapat diklasifikasikan ke dalam subordo atau subgrup baru seperti contoh berikut:

Pada tingkat subordo

- Subordo Udept atau Udert, dapat berubah menjadi subordo Aquept (*great group* Epiaquept) atau Aquert (Epiaquert), bila akibat penyawahan telah menghasilkan kroma rendah, atau mengandung besi-fero aktif pada kedalaman < 50 cm;
- Subordo Udand atau Orthent berubah menjadi Aquand (Epiaquand) atau Aquent (Epiaquent), bila pada kedalaman 40–50 cm ditemukan karatan dengan kroma rendah, atau ditemukan besi-fero aktif akibat penyawahan;
- Subordo Udult atau Udalf berubah menjadi Aquult (Epiaquult) atau Aqualf (Epiaqualf), bila karatan dengan kroma rendah, atau besi-fero aktif ditemukan pada kedalaman 12,5 cm teratas horizon argilik, kandik atau natrik;

Catatan:

Hingga publikasi Taksonomi Tanah terakhir (Soil Survey Staff, 1999; 2003) tidak ditemukan *great group* dengan awalan “*antra(que)*”, seperti

Anthraqualf, Anthraquent, Anthraquept, Anthraquult, dan sebagainya.

“Kondisi anthraquik” hanya digunakan pada tingkat subgrup khusus untuk tanah-tanah yang disawahkan, dan hanya terdapat sebelas subgrup “*anthraquic*”, yaitu masing-masing dua subgrup pada ordo Alfisol, Andisol, Entisol, Inceptisol, dan Ultisol, serta satu subgrup pada ordo Mollisol.

Pada tingkat subgrup

- Typic Dystrudept berubah menjadi Aquic Dystrudept, bila ditemukan kroma rendah, atau besi-fero aktif pada kedalaman <100 cm; atau menjadi Oxyaquic Dystrudept, bila satu lapisan tanah atau lebih, pada kedalaman <100 cm, mengalami jenuh air selama >1 bulan kumulatif, atau >20 hari berturut-turut dalam setahun.
- Beberapa subgrup “typic” juga dapat berubah menjadi subgrup “*anthraquic*”, pada ordo Alfisol, Andisol, Entisol, Inceptisol, Ultisol, dan Mollisol. Hingga publikasi terakhir (Soil Survey Staff, 2003), hanya ditemukan sebelas subgrup “*anthraquic*” seperti telah diuraikan terdahulu.
- Subgrup “*oxyaquic*”, misalnya *Oxyaquic Paleudalf*, *Oxyaquic Udifluent*, dan *Oxyaquic Dystrudept*, merupakan subgrup tanah sawah yang paling mudah/banyak digunakan, karena ditentukan bukan berdasar pada sifat tanah yang telah terbentuk akibat penyawahkan, tetapi hanya didasarkan pada kenyataan adanya satu lapisan tanah atau lebih pada kedalaman <100 cm, yang mengalami jenuh air selama 20 hari atau lebih berturut-turut, atau selama 30 hari atau lebih kumulatif, setiap tahun (Soil Survey Staff, 1999).

(2) Perubahan karena pembuatan teras

Dalam pembuatan teras, bagian atas lereng digali, sedangkan pada bagian bawah lereng, dilakukan penimbunan bahan tanah. Semakin curam lereng, penggalian tanah semakin dalam. Di bagian yang digali, horizon atas penciri (epipedon) dapat hilang, sementara horizon bawah penciri tertinggal sebagian atau hilang sama sekali. Dalam hal ini, dapat terjadi perubahan klasifikasi tanah dari Inceptisol menjadi Entisol (subgrup Lithic). Ultisol atau Alfisol dapat berubah menjadi Inceptisol, karena sebagian bahkan seluruh horizon argilik hilang tergali pada saat pembuatan teras. Kecuali itu, penggalian dapat menyebabkan lapisan plintit menjadi lebih dangkal, sehingga klasifikasi tanah dapat berubah pada tingkat subgrup, misalnya dari Typic Hapludult menjadi Plinthic Hapludult, atau

bahkan pada tingkat *great group*, misalnya Hapludult berubah menjadi Plinthudult.

Pada bagian bawah lereng, yang tertimbun waktu pembuatan teras, terjadi juga perubahan klasifikasi tanah. Di tempat ini, profil tanah asal tertimbun bahan baru, sehingga terbentuk tanah Entisol buatan (*artificial*), atau terbentuk epipedon antropik yang tebal. Akibat penterasan menyebabkan sifat tanah yang kompleks, sehingga dalam satu teras petak sawah baru dapat ditemukan 2–3 polipedon yang sangat berbeda.

(3) Perubahan karena terbentuknya horizon tambahan

Terbentuknya lapisan tapak bajak tidak mempengaruhi klasifikasi tanah sampai tingkat famili, tetapi dapat digunakan sebagai pembeda pada tingkat seri tanah. Terbentuknya lapisan yang banyak mengandung Fe (Bir) dan Mn (Bmn), mungkin dapat juga merubah klasifikasi tanah.

Hal ini terjadi bila Bir yang tipis (1–2 mm) mengeras, sehingga memenuhi syarat sebagai horizon plakik (*placic horizon*). Dalam Taksonomi Tanah, jika horizon ini terbentuk maka dapat dikelompokkan dalam *great group* plakik, misalnya Placaquept dan Placaquand, atau subgrup plakik, misalnya Placic Haplaquept dan Placic Haplaquand.

Adanya akumulasi Fe/Mn yang *tidak* membentuk horizon plakik, bukan penciri Taksonomi Tanah sampai kategori famili. Perlu diusulkan penggunaannya sebagai penciri dalam Taksonomi Tanah, sesuai dengan sifat tanah sawah yang disebut Aquorizem (Kyuma and Kawaguchi, 1966).

(4) Perubahan karena terbentuknya horizon albik

Penggenangan dan pengeringan yang bergantian menyebabkan proses reduksi dan oksidasi yang bergantian di lapisan permukaan tanah, sehingga suatu proses yang disebut ferolisis dapat terjadi di lapisan tersebut, yang dapat membentuk horizon albik. Proses ferolisis umumnya terjadi pada tanah masam yang mengalami penggenangan dan pengeringan silih berganti.

Terjadinya warna pucat, pada dasarnya disebabkan oleh pencucian Fe yang kuat dari lapisan atas, karena pada saat tergenang besi-feri (Fe-III) tereduksi

menjadi besi-fero (Fe-II) yang mudah larut. Suatu proses yang cukup kompleks telah terjadi dalam proses ferolisis, sehingga dapat terjadi penghancuran liat, dan apabila tanah mengandung mineral liat 2:1, maka dapat terbentuk mineral liat 2:1 interlayer, yang disebut "*hydroxy interlayered vermiculite (HIV)*" (Brinkman, 1970). Apabila akibat penyawahan dapat menghasilkan horizon albik, maka klasifikasi tanah dalam tingkat *great group* dapat berubah, misalnya dari Haplaqualf menjadi Albaqualf.

DAFTAR PUSTAKA

- Brinkman, R. 1970. Ferrolyses, a hydromorphic soil forming process. *Geodema* 3: 199-206.
- Dudal, R., and F. R. Moormann. 1964. Major soils of Southeast Asia. *J. Trop. Geogr.* 18: 54-80.
- FAO-UN. 1998. World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Reports* 84, FAO, Rome.
- Grant, G. J. 1965. Soil characteristics associated with the wet cultivation of rice. p. 15-28. *In* IRRI (*Ed.*). *The Mineral Nutrition of the Rice Plant*. John Hopkin Press, Baltimore, Maryland.
- Hsu. C 1962. Geographie regularity of Paitu (white soil) along the midle and lower Yangtse valleys and its farming process. *Acta Pedol, Sin.* 10: 44-54.
- Kanno, I. 1956. A scheme for classification of paddy fields with special reference to mineral soils. *Bull. Kyushu Agric. Exp. Stn.* 4: 261-273.
- Kanno, I., Y. Honyo, S. Arimura, and S. Tokudome. 1964. Genesis and characteristics of rice soils developed on ploder lands of Shiroishi area, Kyushu. *Soil Sci. Plant Nutr.* 10: 1-20.
- Kanno, I. 1978. Genesis of rice soils with special reference to profile development. p. 237-254. *In* IRRI, *Soil and Rice*. Los Banos, Phillipines.

-
- Kawaguchi, K. and K. Kyuma. 1977. Paddy soils in Tropical Asia. Their material nature and fertility. Monograph, Center for Southeast Asia Studies, Kyoto University. University Press of Hawaii, Honolulu, USA.
- Koenigs, F. F. F. R. 1950. A sawah profile near Bogor (Java). Contr. General Agric. Research Station, Bogor, No. 15.
- Kyuma, K., and K. Kawaguchi. 1966. Major soils of Southeast Asia and the classification of soils under rice cultivation. Southeast Asian Stud. 4: 290-312.
- Mitsuchi, M. 1975. Permeability series of lowland paddy soil in Japan. Japan Agric. Sci. Bul. 25: 29-115.
- Moormann, F.R., and N. van Breemen. 1978. Rice, Soil, Water, Land. IRRI Los Banos, Philippines.
- Munir, M. 1987. Pengaruh Penyawahhan terhadap Morfologi Pedogenesis, Elektrokimia dan Klasifikasi Tanah. Disertasi Fakultas Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Rayes, M. L. 2000. Karakteristik, Genesis dan Klasifikasi Tanah Sawah Berasal dari Bahan Vulkan Merapi. Disertasi Program Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Soepraptohardjo, M. and H. Suhardjo. 1978. Rice soils in Indonesia. p. 99-114. *In* IRRI, Soils and Rice. Los Banos, Philippines.
- Soil Survey Staff. 1992. Keys to Soil Taxonomy, Fifth Edition. USDA, Natural Resources Conservation Service.
- Soil Survey Staff. 1996. Keys to Soil Taxonomy, Seventh Edition. USDA, Natural Resources Conservation Service.

Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy, A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second Edition. USDA, Natural Resources Conservation Service.

Soil Survey Staff. 2003. Keys to Soil Taxonomy, Ninth Edition. USDA, Natural Resources Conservation Service.

Tan, K. H. 1968. The genesis and characteristics of paddy soil in Indonesia. Soil Sci and Plant Nutr. 14 (3): 117-121.

Uchiyama, N. 1949. Morphology of paddy soils (in Japanese). Chikyu-Shuppansha, Tokyo. 1st edition. 185 pp.

Wada, H. 1966. A possible classification of paddy soils according to the 7th Approx. Pedologist 10 (2): 141-146.

2. MINERALOGI, KIMIA, FISIKA, DAN BIOLOGI TANAH SAWAH

Bambang Hendro Prasetyo, J. Sri Adiningsih, Kasdi Subagyono, dan R.D.M. Simanungkalit

Tanah sawah dapat terbentuk dari tanah kering dan tanah basah atau tanah rawa sehingga karakterisasi sawah-sawah tersebut akan sangat dipengaruhi oleh bahan pembentuk tanahnya. Tanah sawah dari tanah kering umumnya terdapat di daerah dataran rendah, dataran tinggi vulkanik atau nonvulkanik yang pada awalnya merupakan tanah kering yang tidak pernah jenuh air, sehingga morfologinya akan sangat berbeda dengan tanah sawah dari tanah rawa yang pada awalnya memang sudah jenuh air.

Proses reduksi dan oksidasi merupakan proses-proses utama yang dapat mengakibatkan perubahan baik sifat mineral, kimia fisika dan biologi tanah sawah. Secara lebih rinci perubahan tersebut antara lain hancurnya suatu jenis mineral tanah oleh proses *ferolysis* (ferolisis), turunnya pH tanah secara drastis karena teroksidasinya lapisan tanah yang mengandung pirit, terjadinya iluviasi ataupun eluviasi bahan kimia ataupun partikel tanah dan perubahan sifat fisik dan biologi tanah sawah akibat proses pelumpuran dan perubahan drainase tanah.

MINERALOGI TANAH SAWAH

Mineral merupakan unsur utama penyusun tanah dan berperan penting dalam menentukan sifat kimia dan fisika tanah. Mineral merupakan salah satu indikator penting mengenai pelapukan yang telah terjadi, sehingga keberadaan ataupun absennya suatu jenis mineral di dalam tanah dapat dijadikan suatu petunjuk bagaimana proses pembentukan tanah terjadi.

Mineral di dalam tanah dapat dibedakan atas mineral primer yang disebut juga mineral fraksi pasir dan mineral sekunder atau mineral fraksi liat. Berdasarkan berat jenisnya, mineral primer dapat dibedakan atas mineral berat dan mineral ringan. Mineral berat adalah mineral primer yang mempunyai berat jenis $>2,87$, sedang yang berat jenisnya $<2,87$ disebut mineral ringan. Yang tergolong mineral berat adalah mineral-mineral grup olivin, piroksin, amphibol, mika, rutil, anatas, dan mineral opak. Sedang yang tergolong mineral ringan adalah mineral-mineral grup felspar dan grup silika.

Berdasarkan kemudahan dalam melapuknya, mineral primer dapat dibedakan atas mineral mudah lapuk dan mineral tahan lapuk (resisten). Kelompok mineral mudah lapuk diantaranya adalah mineral-mineral felspar, ferromagnesia seperti olivin, piroksen, amphibol, dan gelas volkan, sedang yang tergolong pada mineral resisten antara lain opak, konkresi besi, zirkon, dan kuarsa.

Peranan mineral di tanah sawah sangatlah penting, selain sebagai sumber hara juga berperan dalam menentukan muatan tanahnya. Pelapukan mineral primer seperti feldspar, ferromagnesian, gelas volkan, mika, zeolit dan apatit di dalam tanah akan menghasilkan unsur-unsur hara seperti Ca, Mg, Na dan K yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Sedangkan mineral sekunder, seperti smektit atau vermikulit (mineral 2:1); klorit (mineral liat 2:1 dengan sisipan Al); serta kaolinit dan haloisit (mineral 1:1) mempunyai muatan yang bervariasi, ada yang negatif adapula yang positif. Tanah sawah yang didominasi oleh mineral liat dengan muatan negatif seperti smektit akan lebih reaktif bila dibanding dominasi mineral dengan muatan positif seperti oksida besi.

Dari segi pengolahan tanahnya, tanah sawah yang didominasi mineral tipe 1:1 kaolinit tidak mempunyai kendala berarti, karena mineral ini tergolong mineral yang stabil. Tanah dengan mineral tipe 2:1 seperti smektit perlu selalu dijaga kelembapannya, karena mineral smektit ini akan mengembang dan mengerut dengan perubahan kelembapan tanah. Apabila tanah bermineral smektit kering maka tanahnya menjadi retak-retak dan sangat keras, sehingga sulit diolah, dan pada waktu retak dapat memutuskan akar-akar tanaman yang sudah ada.

Mineral primer

Mineral primer adalah mineral yang langsung terbentuk dari pengkristalan senyawa-senyawa dalam magma akibat penurunan suhu. Susunan mineral primer dalam tanah, baik tanah sawah maupun tanah yang tidak disawahkan sangat tergantung pada bahan induknya. Mineral primer dijumpai di tanah dalam bentuk fraksi pasir dan sebagian fraksi debu.

Mineral primer fraksi pasir maupun debu ditemukan dalam tanah sebagai hasil pelapukan fisik dari batuan, dari yang semula tersemen berukuran batu kerikil, mengalami pelapukan fisik selama proses pembentukan tanah dan terurai menjadi partikel-partikel berukuran pasir atau debu. Hasil pelapukan fisik batuan yang berupa mineral fraksi pasir maupun debu ini masih mempunyai sifat fisik dan kimia yang sama dengan batuannya.

Selain terbentuk dari pelapukan fisik batuan induk tanah, mineral dalam fraksi debu juga dapat berasal dari aktivitas vulkanisme, pada saat terjadi letusan gunung berapi. Pada saat kejadian tersebut akan sangat banyak mineral primer yang terlontarkan ke udara sebagai abu gunung berapi.

Aktivitas vulkanisme memegang peranan yang penting atas terdistribusinya beberapa jenis mineral. Hasil penelitian Afany dan Partoyo (2001) menunjukkan bahwa abu vulkan Gunung Merapi di Jawa Tengah mengandung mineral-mineral feldspar dan piroksin yang merupakan mineral mudah lapuk dan berpotensi tinggi sebagai cadangan sumber hara dalam tanah.

Komposisi mineral primer mempunyai arti yang penting dari segi pengelolaan tanah sawah. Tanah sawah dengan kandungan mineral mudah lapuk yang tinggi akan mempunyai cadangan sumber hara yang tinggi pula, sebaliknya dominasi mineral resisten pada tanah sawah menunjukkan miskinnya cadangan sumber hara dalam tanah tersebut.

Di dalam tanah mineral primer mempunyai ukuran butir fraksi pasir dan debu merupakan hasil pelapukan fisik dari bahan induk tanah. Komposisi dan asosiasi dari beberapa jenis mineral primer dapat digunakan sebagai indikator cadangan sumber hara dalam tanah dan untuk menduga bahan induk tanahnya. Contoh dari mineral primer yang paling banyak dijumpai pada tanah sawah di Indonesia disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa jenis mineral primer yang banyak dijumpai di tanah sawah di Indonesia

Mineral	Rumus kimia yang ideal***	Unsur utama
Grup Olivin		
Forsterit	Mg_2SiO_4	Mg
Fayalit	Fe_2SiO_4	Fe
Grup Piroksen		
Augit	$(Ca, Na)(Mg, Fe, Al)(Si, Al)_2O_6$	Mg, Fe, Ca
Enstatit	$MgSiO_3$	Mg
Hiperstin	$(Mg, Fe)SiO_3$	Mg, Fe
Grup Amphibole		
- Hornblende	$(Ca, Na)_4-3(Mg, Fe, Al)_5Si_6(Si, Al)_2O_{22}(OH)_2$	Ca, Mg, Fe
Grup Mika	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	
-Muskovit	$K(Mg, Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	K
-Biotit		K
Grup Feldspars		
-K-Feldspars	$KAlSi_3O_8$	
-Orthoklas	$(Na, K)AlSi_3O_8$	K
-Sanidin		K, Na
-Plagioklas	$NaAlSi_3O_8$	
-Albit	$0.62 NaAlSi_3O_8, 0.38 CaAl_2Si_2O_8$	Na
-Andesin	$CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na
-Anorthit	$0.23 NaAlSi_3O_8, 0.77 CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na
-Bytownit	$0.35 NaAlSi_3O_8, 0.65 CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na
-Labradorit	$0. NaAlSi_3O_8, 0.29 CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na
-Oligoklas		Ca, Na
Grup SiO ₂	SiO_2	
Kuarsa	SiO_2	
Gelas vulkan		

***Allen and Fanning (1983)

Tanah yang tidak disawahkan pada umumnya mempunyai komposisi mineral primer yang sama dengan tanah sawah. Hal ini disebabkan oleh persamaan bahan induknya, baik tanah kering maupun yang disawahkan mempunyai komposisi mineral primer yang sama bila bahan induknya sama. Namun beberapa pendapat menyatakan bahwa telah terjadi perubahan susunan mineral primer antara tanah yang disawahkan dengan tanah yang tidak disawahkan (Winoto, 1985; Munir, 1987; dan Rayes, 2000).

Dari penelitian-penelitian tersebut terungkap bahwa tanah yang disawahkan, dengan kondisi tergenang dan dikeringkan bergantian, telah

menyebabkan terjadinya perubahan pada kandungan mineral biotit (Munir, 1987). Kandungan mineral biotit pada tanah yang disawahkan lebih rendah daripada tanah yang tidak disawahkan. Penemuan Winoto (1985) agak berbeda, karena pada tanah sawah kandungan mineral mudah lapuknya lebih tinggi dari tanah yang tidak disawahkan. Namun ketiganya nampaknya sepakat bahwa pada tanah sawah yang selalu tergenang, pelapukan mineral primer akan lebih rendah dari sawah yang kondisinya selalu bergantian antara tergenang dan kering.

Berikut beberapa jenis mineral primer, mulai dari mineral yang paling banyak dijumpai di dalam tanah.

Kuarsa

Kuarsa merupakan jenis mineral primer yang paling banyak dijumpai di tanah pertanian karena mineral ini mempunyai stabilitas yang tinggi terhadap pelapukan. Sumber dari mineral kuarsa adalah batuan beku atau vulkan yang bersifat masam, seperti granit, riolit, pegmatit, dasit dan sebagainya. Proses erosi dan sedimentasi sering menyebabkan terdapatnya kuarsa pada lingkungan yang seharusnya tidak mengandung kuarsa. Karena sifatnya yang resisten, mineral kuarsa tidak terpengaruh oleh proses penggenangan di tanah sawah.

Keberadaan mineral kuarsa yang tinggi dalam tanah dapat mengindikasikan tiga hal: (1) menunjukkan bahwa tanah tersebut sudah mengalami tingkat perkembangan lanjut; (2) menunjukkan cadangan sumber hara tanah yang rendah; dan (3) menunjukkan bahwa bahan induk tanah tersebut bersifat masam. Kandungan kuarsa yang tinggi umumnya terdapat pada sawah alluvial hasil rombakan bahan sedimen, sawah vulkan masam atau rawa pasang surut yang dipengaruhi oleh bahan sediment di bagian hilirnya.

Pada umumnya keberadaan mineral kuarsa pada tanah sawah dapat mempengaruhi sifat fisik sawah tersebut, terutama tekstur dan permeabilitasnya. Tanah sawah yang didominasi oleh mineral primer kuarsa akan cenderung

mempunyai tekstur yang kasar (berpasir). Selain itu pada umumnya tanah yang didominasi oleh kuarsa mempunyai nilai kapasitas tukar kation (KTK) yang rendah.

Grup felspar

Kelompok mineral feldspar merupakan kelompok kedua setelah kuarsa yang mempunyai penyebaran terluas. Kelompok mineral felspar merupakan mineral primer mudah lapuk yang banyak mengandung unsur Na^+ , Ca^+ dan K^+ dan kadang-kadang Ba^{2+} dalam jumlah yang banyak (Huang, 1989). Selain itu dalam mineral feldspars juga terkandung *trace elemen* (unsur mikro) seperti Sr, Rb, Cs, Cu dan Pb (Ribbe, 1975). Walaupun kandungan unsur mikro pada feldspar lebih rendah bila dibanding mineral olivin, piroksin dan amphibol, namun mineral feldspar lebih banyak jumlah dan penyebarannya, sehingga kelompok ini merupakan sumber unsur mikro yang sangat penting (Huang, 1989). Sumber utama dari mineral ini adalah batuan beku/vulkan dan metamorf, sehingga mineral ini akan selalu dijumpai pada batuan sedimen dalam jumlah yang bervariasi sesuai dengan sumber dan tingkat pelapukannya.

Felspar dijumpai hampir pada semua jenis tanah, namun kandungannya bervariasi sesuai dengan tingkat pelapukan dan perkembangan tanahnya. Pelapukan plagioklas mempunyai hubungan yang penting dengan penyediaan Ca dalam tanah. Kondisi ini juga dapat menjelaskan mengapa Ca di dalam tanah selalu lebih tinggi konsentrasinya dibanding Mg, Na dan K. Ada tidaknya mineral plagioklas dalam bahan induk tanah akan mempengaruhi tingkat produktivitas tanah (Huang, 1989). Pelapukan mineral feldspars dilaporkan telah menghasilkan beberapa jenis mineral liat, seperti haloisit (Calvert *et al.*, 1980), allofan (Eswaran *et al.*, 1973), kaolinit (Gilkes *et al.*, 1973; Rice *et al.*, 1985), dan smektit (Glassmann, 1982).

Tabel 2. Komposisi mineral primer tanah sawah alluvial dari pedon HP 5 di daerah Indramayu (Vertic Endoaquepts) dengan kandungan mineral

feldspar tergolong tinggi (Prasetyo *et al.*, 1996)

Kedalaman	Op	Ku	Lm	Fb	Gv	An	Sa	Or	Hb	Au	Hp
	%										
0 - 20	5	24	6	7	4	36	6	3	2	2	5
20 - 40	9	40	2	8	3	20	3	2	2	4	7
40 - 68	4	40	3	7	1	25	5	2	1	3	9
68 - 82	5	35	3	6	2	29	3	3	2	2	10
82 - 130	11	32	6	7	2	27	2	2	2	2	7

Keterangan: Op= opak, Ku= kuarsa, Lm= lapukan mineral, Fb= frakmen batuan, Gv= gelas vulkan, An= andesin; Sa= sanidin; Or= orthoklas; Hb= hornblende, Au= aAugit; Hp= hiperstin.

Pada tanah sawah di Indonesia mineral felspar hampir selalu dijumpai. Tinggi rendahnya kandungan mineral felspar sangat dipengaruhi oleh bahan induk tanah dan tingkat pelapukan ataupun perkembangan tanahnya. Umumnya tanah sawah vulkan dan alluvial mempunyai kandungan mineral felspar yang cukup tinggi (Subardja and Buurman, 1980; Prasetyo *et al.*, 1996; Setyawan dan Warsito, 1999). Tingginya kandungan mineral felspar ini dapat mempengaruhi produktivitas tanah sawah, karena tanah sawah akan mempunyai kandungan dan cadangan hara Ca dan K yang tinggi, sehingga tingkat kesuburan tanah terjaga.

Contoh dari tanah sawah yang mempunyai kandungan mineral felspar tinggi disajikan pada Tabel 2 dan merupakan tanah sawah alluvial.

Grup olivin, piroksin, dan amphibol

Kelompok olivin, piroksin (augit, hipersten) dan amphibol (hornblende), yang disebut juga sebagai mineral ferromagnesium, merupakan kelompok mineral yang merupakan sumber Ca, Mg dan Fe dalam tanah. Mineral-mineral hornblende, augit

dan hiperstin adalah sumber Ca dan Mg dalam tanah. Menurut Mohr *et al.* (1972), sumber Ca dalam tanah diantaranya adalah augit (16-26% CaO), dan hiperstin (19-25% CaO), dan sumber Mg adalah augit (13-21% MgO) dan hornblende (2-25% MgO). Olivin terutama dijumpai pada batuan yang bersifat basa, sedang piroksin dan amphibol lebih banyak berasal dari batuan yang bersifat intermedier. Di antara ketiga grup tersebut, olivin merupakan grup mineral yang paling mudah melapuk.

Tabel 3. Komposisi mineral primer pada tanah sawah vulkan Pedon HP7 (Chromic Hapluderts) dari daerah Gunung Wilis, Madiun yang didominasi oleh mineral ferromagnesian (Prasetyo *et al.*, 1996)

Kedalaman cm	Op	Ku	L.min	F b	GV	PI	Hr	Au	Hp
	%								
0 - 25	5	6	1	10	1	2	19	53	3
25- 55	8	9	0	6	1	2	20	50	4
55-90	7	7	0	4	1	3	28	48	2
90-110	9	7	2	1	1	1	25	52	2
110-140	9	6	2	2	3	3	16	57	3

Keterangan: Op= opak, Kb= konkresi besi, Ku= kuarsa, Lm= lapukan mineral, Fb= fragmen batuan, Gv= gelas vulkan, Pi= plagioklas intermedier, Hr= hornblende, Au= augit, Hp= hiperstin

Tergantung pada jenisnya, unsur hara yang dihasilkan oleh mineral olivin juga bervariasi. Unsur hara Mg dihasilkan oleh olivin dari jenis Forsterit dan Fe oleh Fayalit. Mineral dari grup piroksin dan amphibol lebih banyak dijumpai di tanah sawah. Kedua grup mineral ini banyak dijumpai di tanah sawah vulkan dan alluvium (Subardja and Buurman, 1980; Prasetyo *et al.*, 1996; dan Setyawan dan Warsito, 1999).

Contoh tanah sawah yang didominasi oleh mineral ferromagnesian disajikan pada Tabel 3. Pada komposisi mineral primer tersebut tidak dijumpai mineral olivin. Mineral olivin tergolong pada mineral yang pertama-tama melapuk sehingga di tanah olivin mungkin sudah tidak dijumpai.

Grup mineral opak

Mineral opak adalah mineral primer dari jenis magnetit dan ilmenit yang berwarna kelam metalik. Mineral ini banyak dijumpai pada tanah tanah yang berbatu induk basaltik (Allen and Hajek, 1989). Mineral ini tergolong pada kelompok mineral resisten, sehingga sering kali opak bersama kuarsa mendominasi komposisi mineral primer dalam tanah. Tanah yang didominasi oleh mineral opak mengindikasikan bahwa tanah tersebut sudah mengalami tingkat pelapukan lanjut dan miskin akan sumber hara. Kandungan magnetit yang tinggi dalam tanah dapat mengakibatkan hasil analisis Fe yang diekstrak dengan oxalat maupun dithionit menjadi lebih tinggi (*overestimate*) (Walker, 1983).

Contoh tanah sawah bukaan baru yang didominasi oleh mineral opak disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi mineral primer pada tanah sawah bukaan baru (Typic Hapludox) yang didominasi oleh mineral opak, dari daerah Lampung Utara (Prasetyo *et al.*, 1995)

Kedalaman	Op	Zi	Ku	F b	Au	Hp
cm	%					
0 - 14	53	1	45	-	1	-
14 - 45	51	2	47	-	-	-
45 - 68	61	4	34	1	-	-
68 - 90	52	1	47	-	-	-
90 - 105	67	2	31	-	-	-

Keterangan: Op= opak, Zi= zirkon, Ku= Kuarsa, Fb= fragmen batuan, Au= augit, Hp= hiperstin

Gelas volkan

Gelas volkan berasal dari sisa-sisa magma yang telah mengalami kristalisasi, karena itu komposisi kimia dari gelas volkan berbeda-beda, tergantung dari senyawa-senyawa kimia yang tertinggal setelah pembentukan mineral kristalin. Di suatu tempat gelas volkan mungkin hampir seluruhnya didominasi SiO₂, tetapi

ditempat lain mungkin mengandung unsur-unsur kimia lainnya seperti P, Ca, Mg, K dan sebagainya. Gelas vulkan yang banyak mengandung Si terdapat pada batu apung. Mineral ini tergolong pada jenis mineral mudah lapuk. Pelapukan mineral ini dapat menghasilkan mineral amorf allophan.

Pelapukan gelas vulkan atau pelarutannya pada tanah sawah dapat membentuk suatu lapisan padas yang keras (duripan) di tanah sawah. Pengendapan silika amorf dapat terjadi apabila konsentrasi H_4SiO_4 dalam larutan melebihi 1,25 mmol/l, dan pembentukan duripan memerlukan kelembapan yang cukup untuk pelapukan mineral primer dan pengangkutan silika larut, namun kondisi iklim tidak boleh terlalu basah (van Breemen *et al.*, 1992).

Hasil penelitian Rayes *et al.* (2003) menunjukkan bahwa pada tanah sawah maupun lahan kering dari bahan vulkan di daerah lereng Merapi, Yogyakarta, terbentuk lapisan duripan, yaitu horizon bawah yang tersementasi oleh silika dengan atau tanpa bahan penyemen lainnya. Pada kedalaman sekitar 17–22 cm pada tanah tersebut dijumpai lapisan yang lebih lunak, yang merupakan tapak bajak yang mengalami penyemenan oleh besi dan mangan (Rayes, 2000), dan di lapisan bawahnya terdapat lapisan padas yang amat keras (duripan) mulai kedalaman sekitar 22–110 cm. Meskipun jumlah semen silika dalam duripan hanya sedikit, namun dapat berpengaruh terhadap sifat fisik tanah. Menurut penelitian tersebut warna duripan yang kemerahan disebabkan oleh adanya oksida dan hidroksida besi dan mangan (Mn) yang berperan juga sebagai bahan penyemen.

Sebagian besar lapisan duripan terdapat di daerah yang dipengaruhi oleh proses vulkanisme (Soil Survey Staff, 1999). Duripan terbentuk karena adanya pengendapan/pelapukan silika dari bahan gelas vulkan dan bahan-bahan amorf yang berlangsung secara cepat, atau pelapukan mineral-mineral feldspar dan ferromagnesian yang lambat dan lama (Flach *et al.*, 1969).

Mineral sekunder

Mineral sekunder atau mineral liat adalah mineral berukuran halus ($<2\mu$), terbentuk pada waktu proses pembentukan tanah, merupakan hasil pelapukan kimiawi dari mineral primer ataupun hasil pembentukan baru dalam proses pembentukan tanah sehingga mempunyai susunan kimia dan struktur yang berbeda dengan mineral yang dilapuk. Jenis mineral liat yang terbentuk dalam proses pembentukan tanah umumnya tergantung pada jenis dan konsentrasi dari susunan kation, Si, pH dan kecepatan pencucian basa-basa dari hasil pelapukan (Buol *et al.*, 1980). Beberapa jenis mineral liat yang banyak dijumpai di Indonesia disajikan dalam Tabel 5. Mineral liat pada tanah yang tidak disawahkan juga dapat mempunyai komposisi demikian. Perbedaan antara mineral liat pada tanah yang disawahkan dan tidak disawahkan akan dibahas tersendiri.

Pengaruh mineral liat pada sifat fisika dan kimia tanah sawah

Jenis dan jumlah mineral liat dapat mempengaruhi sifat fisika dan kimia tanah sawah. Tanah sawah yang didominasi oleh mineral monmorilonit, pada waktu kering akan rekah-rekah dan menjadi sangat keras sehingga sulit untuk diolah. Tanah sawah yang didominasi oleh monmorilonit tersebut bila digenangi akan mengalami peningkatan pori mikro yang sangat tinggi, dan bila kering akan membentuk struktur prismatic yang sangat keras sehingga sulit untuk diolah (Hardjowigeno dan Rayes, 2001).

Sebaliknya di musim basah tanah akan mengembang dan melumpur, umumnya sangat lekat. Tanah sawah yang didominasi mineral liat tipe 2:1 (monmorilonit) akan sulit membentuk lapisan tapak bajak karena sifat mengembang dan mengkerut dari mineral tersebut. Lapisan tapak bajak yang mulai terbentuk akan hancur ketika terjadi pengerutan pada mineral monmorilonit. Dominasi mineral liat tipe 1:1 (kaolinit) tidak berpengaruh negatif pada sifat fisika tanah sawah karena

mineral ini tidak menyebabkan perubahan sifat fisik tanah yang nyata.

Tanah sawah yang didominasi oleh mineral smektit mencirikan terjadinya akumulasi basa-basa dan lingkungan yang bereaksi netral hingga basis dengan drainase tanah jelek, dan mempunyai muatan negatif (KTK) yang tinggi karena adanya substitusi Al^{3+} oleh Mg^{2+} . Namun bila terjadi perubahan sifat lingkungan (misalnya penurunan pH tanah), pelapukan mineral monmorilonit dapat menghasilkan Al-dd dalam jumlah yang cukup signifikan. Sebaliknya tanah sawah yang didominasi oleh kaolinit mencirikan lingkungan yang bereaksi masam hingga sangat masam, dan mempunyai muatan negatif yang rendah karena substitusi isomorfik pada mineral ini hampir tak pernah terjadi.

Pengaruh penyawahkan terhadap mineral liat

Tanah sawah mengalami kondisi tergenang dan kering yang bergantian, sehingga dapat mempercepat terjadinya pelapukan pada beberapa jenis mineral liat yang dikandungnya.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui terjadinya pelapukan pada mineral liat dengan cara membandingkan tanah yang disawahkan dengan yang tidak disawahkan.

Hasil penelitian Munir (1987) menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan jenis mineral liat pada beberapa jenis tanah yang disawahkan. Mineral liat tipe 2:1 seperti vermikulit dan monmorilonit pada lapisan olah di beberapa lokasi persawahan telah mengalami pelapisan (*interlayer*) oleh polimer Al. Menurut Barnhisel (1977) pelapisan pada vermikulit maupun monmorilonit dikatakan penuh bila difraktogram hasil analisis dengan difraksi sinar X (XRD) pada perlakuan pemanasan $550^{\circ}C$ menunjukkan $d(001)$ 14 \AA . Sedang bila nilainya antara 10 \AA dan 14 \AA dikatakan pelapisannya belum penuh.

Pelapisan terjadi bila tanah masam, banyak unsur Al, dan ada proses penggenangan dan pengeringan yang silih berganti. Pelapisan mineral oleh

polimer Al hanya dimungkinkan terjadi pada mineral tipe 2:1 karena mineral ini mempunyai permukaan dalam (*internal surface*) yang terletak di antara kisi-kisi mineral. Pada mineral tipe 1:1 seperti kaolinit tidak terjadi pelapisan karena pada strukturnya tidak dijumpai adanya permukaan antar kisi. Akibat senyawa polimer Al yang bermuatan positif menduduki tapak pertukaran dari liat yang bermuatan negatif akan terjadi penurunan KTK tanah. Proses ini disebut ferolisis.

Ferolisis adalah proses pembentukan tanah yang diakibatkan oleh penghancuran mineral liat oleh kondisi oksidasi dan reduksi yang silih berganti (Brinkman, 1970). Di dalam proses ini terjadi pelepasan Al dan kation lain dari kisi lapisan Al-oktahedron dan Si-tetrahedron pada struktur mineral liat.

Aluminium yang terbebaskan akan menjadi polimer Al yang terbentuk di antara lapisan maupun melapisi mineral liat tipe 2:1 (vermikulit, monmorilonit). Karena polimer Al bermuatan positif maka polimer ini akan menetralkan muatan negatif pada permukaan mineral liat. Akibatnya akan terjadi penurunan KTK dari mineral 2:1 karena muatan negatif yang terdapat pada tapak pertukaran (*exchange site*) telah didominasi oleh polimer Al yang bermuatan positif.

Proses ferolisis yang terjadi sebagai akibat penyawahan yang menyebabkan penurunan KTK ini sangat merugikan karena dapat menurunkan tingkat produktivitas tanah. Kemampuan tanah untuk menahan unsur hara dari pemupukan akan menurun sehingga sebagian unsur hara akan hilang tercuci air.

Beberapa jenis mineral liat yang banyak dijumpai

Mineral liat pada tanah sawah di Indonesia yang banyak dilaporkan adalah kaolinit, monmorilonit, vermikulit, monmorilonit dan vermikulit (*interstratified*) dengan pelapisan polimer Al, haloisit, goethit dan ferrihidryt, serta gibbsite (Munir, 1987; Prasetyo *et al.*, 1995; 1996; 1997; 1998; Taberima, 1999; dan Rayes, 2000). Tabel 5 menyajikan data jenis mineral liat yang banyak dijumpai pada tanah sawah di Indonesia.

Grup mineral smektit

Mineral smektit adalah tipe mineral 2:1 yang mempunyai beberapa sifat yang spesifik sehingga keberadaannya pada tanah sawah dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia tanah sawah tersebut. Sifat smektit yang penting antara lain mempunyai muatan negatif (*negative charge*) yang menyebabkan mineral ini sangat reaktif dalam lingkungannya, mempunyai kapasitas tukar kation yang tinggi, dan kemampuannya yang dapat mengembang bila basah ataupun mengkerut bila kering. Di dalam tanah mineral smektit dapat berasal dari bahan induk tanah (*inherited*), dan hasil pelapukan mineral phyllosilikat (Allen and Hajek, 1989).

Tabel 5. Beberapa jenis mineral liat yang sering di jumpai di tanah sawah Indonesia

Mineral	Rumus kimia yang ideal	Sifat-sifat umum
Grup smektit - Montmorillonit	$Al_4(Si_4O_{10})_2(OH)_4$	Mempunyai kemampuan mengembang dan mengkerut, dengan nilai KTK antara 80 – 150 cmol(+) kg liat ⁻¹
Grup Vermikulit	$(MgFe)_3(Al_xSi_{4-x})O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ Mg	Terbentuk dari pelapukan mika, dengan nilai KTK antara 100 – 150 cmol(+) kg liat ⁻¹
Grup Kaolin - Kaolinit - Halosit	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	Dapat terbentuk dari pelapukan mineral liat lainnya, seperti monmorilonit ataupun vermikulit, mempunyai nilai KTK 3 – 15 cmol(+) kg liat ⁻¹
Grup oksida besi - Goethit - Hematit - Lepidocrosit - Maghemit - Ferrihidrit	FeOOH Fe ₂ O ₃ FeOOH	Terbentuk dari Fe hasil pelapukan mineral primer di bawah pengaruh faktor-faktor pembentuk tanah lainnya.

Berikut uraian beberapa jenis mineral liat, mulai dari yang paling banyak dijumpai di dalam tanah

Pembentukan mineral smektit memerlukan kondisi-kondisi sebagai berikut

(1) curah hujan harus cukup untuk menyebabkan terjadinya pelapukan, tapi tidak

menyebabkan pencucian basa-basa dan silika; (2) adanya masa-masa kering yang diperlukan untuk kristalisasi smektit; (3) drainase yang terhambat sehingga terhindar dari proses pencucian dan hilangnya bahan-bahan hasil pelapukan; serta (4) suhu tinggi untuk menunjang proses pelapukan (Driessen and Dudal, 1989). Lingkungan yang berdrainase jelek, dengan pH netral hingga alkalis, dan akumulasi basa-basa terutama Mg, dan silika merupakan lingkungan yang sesuai untuk pembentukan mineral smektit (Jackson, 1968; De Coninck, 1974; Borchardt, 1977; Van Wambeke, 1992). Peneliti-peneliti terdahulu juga menyatakan bahwa mineral smektit dapat terbentuk melalui proses pelarutan mineral plagioklas dari pelapukan batuan andesit (Glassmann, 1982), atau hasil pelapukan langsung dari feldspar pada tanah-tanah Vertisols (Nettleton *et al.*, 1970), hasil pelapukan dari hornblende (Rice *et al.*, 1985) dan hasil pelarutan mineral augit (Glassmann, 1982; Glassmann and Simonson, 1985).

Dominasi mineral smektit di tanah sawah menyebabkan tanah sawah tersebut akan memberi respon yang lebih baik pada waktu pemupukan, karena KTK dari smektit yang tinggi akan meningkatkan nilai KTK tanah. Selain itu keberadaan smektit juga akan lebih meningkatkan kemampuan tanah dalam menangkap kation-kation yang berasal dari pupuk seperti K^+ atau NH_4^+ , hara makro seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} dan hara mikro seperti Cu^{2+} dan Zn^{2+} (Borchardt, 1989). Namun dominasi smektit pada tanah sawah juga dapat berdampak buruk pada sifat fisik tanah. Tanah sawah yang didominasi mineral smektit bila mengering akan menjadi rekah-rekah dan sangat keras, karena mineral smektit mempunyai sifat mengembang bila basah dan mengkerut bila kering. Praktis pada waktu kering tanah sawah seperti ini tidak dapat ditanami tanaman pangan karena selain sangat sulit diolah, akar tanaman juga sering putus sebagai akibat rekahan yang terjadi.

Akibat penyawahan, dengan kondisi oksidasi dan reduksi yang silih berganti telah menyebabkan terbentuknya senyawa polimer yang terdapat di dalam mineral (*interlayer*). Pada smektit yang umumnya terdapat pada tanah

dengan pH yang relatif tinggi, tingkat pelapisan polimer Al umumnya rendah, karena selain Al yang sedikit, laju dekomposisi mineral umumnya rendah pada lingkungan pH yang tinggi. Namun pada lingkungan yang masam hingga sangat masam, pelapisan Al akan sangat kuat, sehingga semua mineral smektit dapat melapuk menjadi klorit.

Di Indonesia mineral smektit dilaporkan dijumpai di tanah sawah tufa vulkan augit-hornblende andesitik (Prasetyo *et al.*, 1996), aluvial (Prasetyo *et al.*, 1996; Prasetyo dan Kasno, 1998; Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 1996) dan rawa pasang surut (Prasetyo, 1995; Prasetyo *et al.*, 2001; dan Subandiono, 2004).

Prasetyo *et al.* (1996) melaporkan bahwa smektit pada tanah sawah vulkan di daerah Madiun berasal dari bahan induk tanah, dan merupakan hasil pelapukan mineral-mineral primer di daerah tersebut pada lingkungan yang memenuhi syarat untuk pembentukan smektit. Reaksi tanah netral, drainase tanah jelek serta tidak terjadinya pencucian basa-basa di daerah vulkan ini merupakan kondisi yang cocok untuk stabilitas mineral smektit, sehingga status kesuburan tanahnya tetap tinggi.

Pada tanah sawah aluvial pada umumnya mineral smektit lebih banyak dijumpai, karena dataran alluvial pada umumnya merupakan lingkungan tempat terakumulasinya basa-basa dan silika. Namun demikian tidak semua sawah di dataran alluvial mengandung mineral smektit, hal tersebut sangat ditentukan oleh bahan yang terendapkan di dataran aluvial tersebut.

Smektit kebanyakan dijumpai bersama mineral liat lainnya, seperti illit dan kaolinit. Terdapatnya smektit dengan kaolinit secara bersamaan sangat dimungkinkan. Kaolinit dapat terbentuk sebagai hasil pelapukan smektit pada lingkungan yang masam, dan dapat pula terdapat di dalam tanah sebagai hasil pelapukan di daerah hulu yang terendapkan di sistem pengendapan bahan alluvial. Hasil penelitian Prasetyo dan Kasno (2001) menunjukkan bahwa tanah sawah aluvial masam di daerah Gadingrejo, Lampung mempunyai kandungan

mineral liat campuran smektit dan kaolinit. Adanya kaolinit di sini merupakan hasil pelapukan dari smektit, karena pada lingkungan yang masam mineral smektit dapat melapuk menjadi kaolinit. Penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo *et al.* (1996) pada tanah sawah aluvial di daerah Indramayu menunjukkan kandungan mineral liat yang sama, yaitu campuran antara smektit dan kaolinit, namun pH tanahnya tidak masam. Dalam hal ini kaolinit bukan merupakan pelapukan dari smektit, melainkan hasil pengendapan dari daerah hulu.

Adanya mineral illit bersama smektit merupakan bagian dari proses pembentukan/transformasi illit-smektit. Menurut Borchardt (1977) kondisi yang memungkinkan transformasi illit-smektit adalah suhu dan tekanan rendah, konsentrasi Al dan K⁺ harus rendah, konsentrasi Si(OH)₄ harus tinggi dan pH >6,5. Bila pH <6 maka illit akan melapuk menjadi vermikulit dan selanjutnya kaolinit (Ismail, 1970).

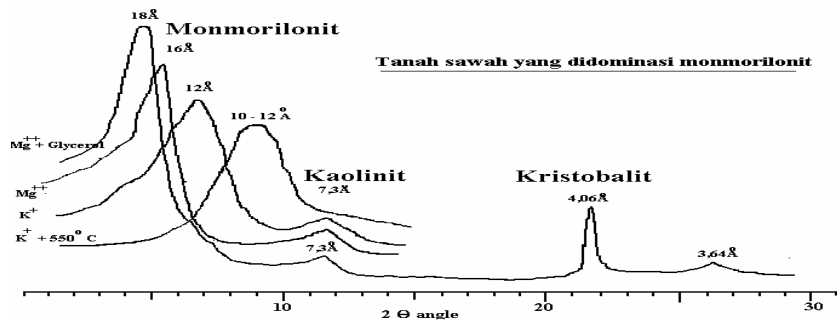
Pada umumnya kondisi mineral smektit pada tanah sawah aluvial cukup stabil, karena perubahan pH tanah tidak drastis. Gambar 1 menunjukkan difraktogram dari tanah sawah yang didominasi oleh mineral smektit (atas), serta tanah sawah dengan komposisi mineral liat campuran antara smektit, kaolinit dan illit (bawah).

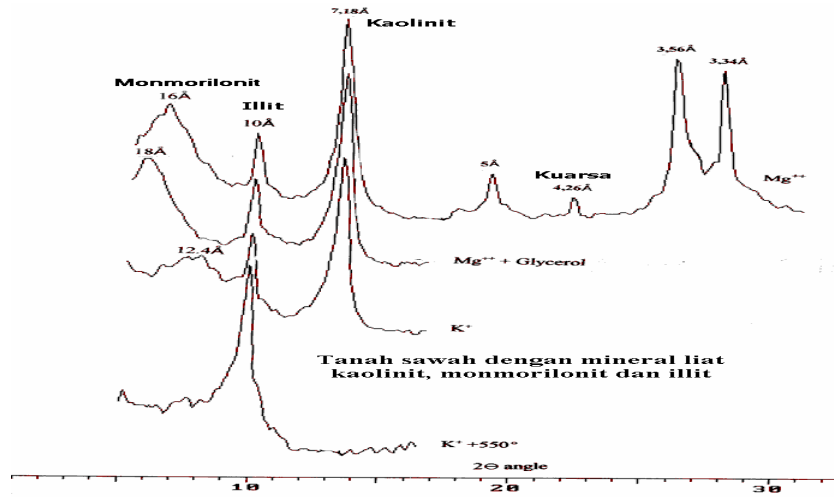
Pada Gambar 1 terlihat bahwa nilai difraksi sinar-x d(001) pada tanah sawah yang didominasi oleh monmorilonit menunjukkan angka yang berkisar antara 10 hingga 12, ini berarti sudah ada pelapisan polimer Al pada monmorilonit tersebut. Namun pelapisan polimer Al masih belum tampak jelas, mengingat pada tanah tersebut pH nya >6,5 sehingga monmorilonit masih relatif stabil.

Terdapatnya illit pada tanah sawah pasang surut di Pulau Petak menunjukkan adanya bahan mika. Smektit dapat terbentuk sebagai hasil transformasi dari mika pada lingkungan yang reduktif, melalui proses pencucian kalium dan aluminium dan tersedianya akumulasi silica (Borchardt, 1989). Lingkungan yang diperlukan untuk transformasi dari mika ke smektit adalah

keadaan dimana konsentrasi K^+ dan Al^{3+} rendah, konsentrasi $Si(OH)_4$, Mg^{2+} atau Ca^{2+} tinggi dan pH berkisar antara 6 hingga 7 (Huang, 1966). Lingkungan seperti tersebut di atas mungkin pernah dimiliki oleh bahan endapan *marin* di Pulau Petak, yaitu pada saat lingkungannya masih alami.

Mineral klorit yang terdeteksi merupakan klorit sekunder (*secondary chlorite*) hasil proses ferolisis. Ferolisis ini terjadi sebagai akibat perubahan kondisi oksidasi dan reduksi yang silih berganti pada tanah yang masam. Menurut Gac (1968), pada lingkungan dimana Al yang dibebaskan dari hasil pelapukan mineral liat (smektit) tidak dapat tercuci dari lingkungan tersebut, maka akan terbentuk suatu struktur lembaran gipsit yang akhirnya membentuk klorit sekunder. Terbentuknya klorit menunjukkan bahwa pelapisan polimer Al telah sempurna.





Gambar 1. Difraktogram sinar-x tanah sawah yang didominasi mineral monmorilonit (Gambar atas) dan campuran kaolinit, monmorilonit, illit (Gambar bawah)

Kaolinit di daerah Pulau Petak mungkin merupakan hasil pembentukan di daerah hulu Sungai Kapuas dan terendapkan di muara Kapuas, dan sebagian lagi merupakan hasil pelapukan smektit. Menurut Ismail (1970) pada lingkungan yang sangat masam baik smektit dapat secara langsung melapuk membentuk kaolinit maupun klorit sekunder.

Grup mineral kaolin

Kaolinit merupakan mineral liat tipe 1:1 yang paling banyak dijumpai di Indonesia. Mineral kaolinit umumnya terbentuk pada lingkungan yang pencucian basa-basanya intensif, reaksi tanah masam, dengan drainase tanah yang relatif baik (Tardy *et al.*, 1973; van Wambeke, 1992). Namun lingkungan seperti ini umumnya hanya dimiliki oleh tanah-tanah berlereng di tanah kering.

Kaolinit dapat terbentuk oleh Al dan Si yang terbebaskan dari mineral-

mineral primer ataupun mineral sekunder. Pada tanah-tanah yang berkembang dari batuan beku, kaolinit dapat terbentuk dari pelapukan mineral feldspar. Halosit banyak dijumpai di daerah vulkan yang kaya akan abu dan gelas vulkan. Mineral liat ini terbentuk sebagai pelapukan awal dari feldspar ataupun hasil pelapukan dari alofan. Halosit tergolong mineral yang kurang stabil, dan cepat melapuk membentuk kaolinit.

Di tanah sawah yang umumnya mempunyai relief datar hingga agak cekung, lingkungan akumulasi lebih dominant daripada pencucian, sehingga ada dugaan bahwa kebanyakan mineral kaolinit di tanah sawah merupakan hasil rombakan bahan di daerah yang lebih tinggi, dan terendapkan di sawah. Namun demikian tidak menutup kemungkinan terbentuknya kaolinit sebagai hasil pelapukan mineral smektit pada kondisi pH tanah masam hingga sangat masam (Wilson and Cradwick, 1972).

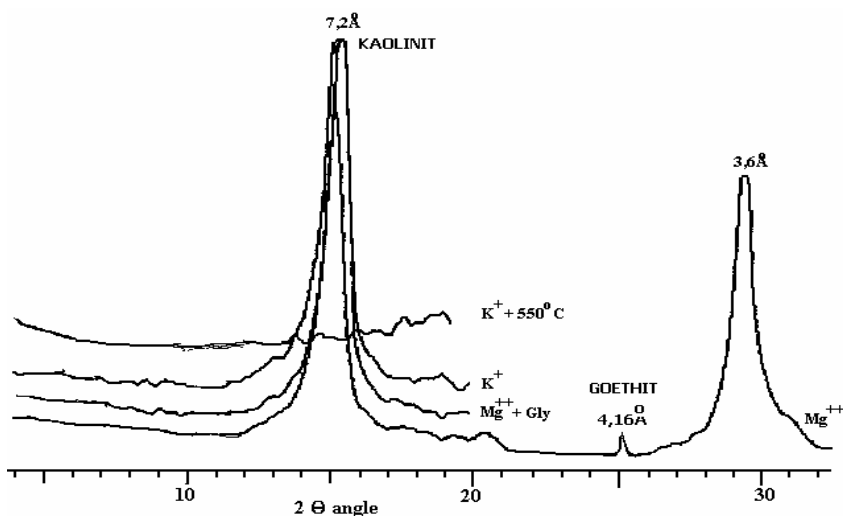
Penyawahannya umumnya tidak mempengaruhi mineral kaolinit sebab pada mineral tipe 1:1 seperti kaolinit tidak terjadi pelapisan pada strukturnya karena tidak dijumpai adanya permukaan antarkisi.

Pada tanah kering dominasi kaolinit dapat diartikan sebagai penciri miskinnya kandungan basa-basa dapat dipertukarkan dan cadangan sumber hara di dalam tanah, namun dominasi kaolinit di tanah sawah tidak selalu berarti demikian. Hasil penelitian pada tanah sawah di Bogor (Subardja and Buurman, 1980) dan tanah sawah di Tugumulyo (Setyawan dan Warsito, 1999) menunjukkan bahwa tanah sawah yang didominasi kaolinit masih mempunyai kandungan basa-basa dan cadangan sumber hara dalam tanah yang cukup tinggi. Pengecualian adalah pada tanah sawah bukaan baru, karena bahan induk tanah tersebut (tufa masam) merupakan bahan yang tergolong miskin hara tanah.

Dominasi kaolinit pada tanah sawah tidak memberikan dampak yang berarti baik pada sifat kimia maupun sifat fisika tanah, karena mineral kaolinit mempunyai muatan negatif yang rendah dan substitusi isomorfik pada mineral ini

hampir tak pernah terjadi. Kapasitas tukar kation kaolinit sangatlah rendah, kaolinit murni mempunyai KTK antara 0–1 cmol(+) kg⁻¹ (Lim *et al.*, 1980). Kapasitas tukar kation (KTK) kaolinit dari tanah berkisar antara 1,2–12,5 cmol(+) kg⁻¹ (Prasetyo and Gilkes, 1997) dan antara 2–12,2 cmol(+) kg⁻¹ (Brindley *et al.*, 1986). Perubahan pori mikro akibat proses penyawahan pada tanah yang didominasi kaolinit tidak setinggi tanah sawah yang didominasi smektit. Tanah sawah dengan kaolinit ini bila kering akan membentuk struktur gumpal yang tidak sulit untuk diolah (Hardjowigeno dan Rayes, 2001).

Pada tanah sawah, kaolinit banyak dijumpai bersama smektit. Namun pada tanah sawah masam, sering kaolinit dan haloisit mendominasi susunan mineral liat (Subardja and Buurman, 1980; Setyawan dan Hanum, 2003). Kaolinit juga mendominasi susunan mineral pada tanah sawah bukaan baru di daerah Kotabumi, Lampung (Prasetyo *et al.*, 1995; Prasetyo *et al.*, 1997). Dominasi kaolinit pada tanah sawah bukaan baru ini disebabkan karena tanah sawah ini merupakan konversi dari lahan kering yang tanahnya sudah mengalami perkembangan lanjut (Oxisols) yang tinggi kandungan kaolinitnya. Gambar 2 menunjukkan difraktogram sinar-x dari tanah sawah yang didominasi kaolinit.



Gambar 2. Difraktogram sinar-X fraksi liat tanah sawah bukaan baru dari tufa vulkan masam (HP 13, 45-68 cm) di Kotabumi, Provinsi Lampung

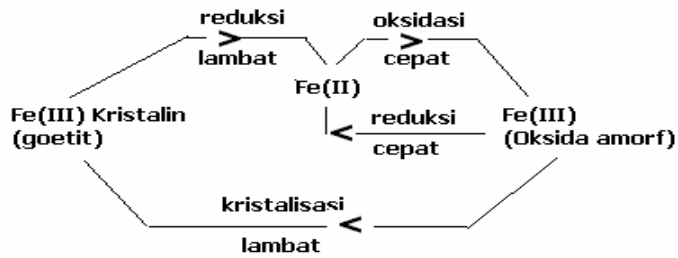
Grup mineral oksida besi

Mineral oksida besi adalah jenis mineral oksida yang paling banyak dijumpai dalam tanah, dan terbentuk dari Fe yang dilepaskan oleh mineral primer selama proses pelapukan. Mineral ini dapat dijumpai dalam keadaan terdistribusi di seluruh horizon tanah, terkonsentrasi pada salah satu horizon tanah, ataupun hanya pada karatan, dan nodul. Walaupun konsentrasinya hanya kecil, keberadaan oksida besi dalam tanah dapat mempengaruhi warna tanah (Schwertmann and Taylor, 1989). Di antara kelompok oksida besi, goethite dan hematit merupakan dua jenis mineral oksida besi kristalin yang paling banyak dijumpai. Dalam jumlah lebih sedikit, terutama pada tanah sawah ataupun di tanah berdrainase jelek, sering dijumpai lepidocrosit dan ferryhidrit. Oksida besi jenis ferryhidrit merupakan oksida besi yang bersifat amorf.

Adanya oksida besi dalam tanah dapat mempengaruhi sifat morfologi, fisik maupun kimia tanah, dan sekaligus memberi informasi mengenai proses-proses pembentukan tanah di lingkungan tersebut (Schwertmann and Taylor, 1989; Allen and Fanning, 1983). Hematit (Fe_2O_3) cenderung menyebabkan warna merah pada tanah (hue 5R hingga 2,5YR), goethit (FeOOH) yang merupakan oksida besi yang paling banyak dijumpai menyebabkan warna coklat kekuningan hingga coklat gelap pada tanah, dan lepidocrosit (FeOOH) yang banyak terdapat pada karatan mempunyai warna orange (5YR hingga 7,5 YR) yang mirip goethit.

Proses penggenangan dan pengeringan pada tanah sawah telah menyebabkan terjadi reduksi dan oksidasi atas oksida besi. Pada waktu digenangi air, Fe^{+++} akan tereduksi menjadi Fe^{++} yang mudah terbawa air, dan pada waktu kering besi Fe^{++} ini akan teroksidasi dan mengendapkan Fe^{+++} sebagai

goethite, lepidocrosit atau ferryhidrit. Mekanisme perubahan besi oksida kristalin karena proses penggenangan disajikan pada Gambar 3.



Sumber: Hardjowigeno dan Reyes (2001)

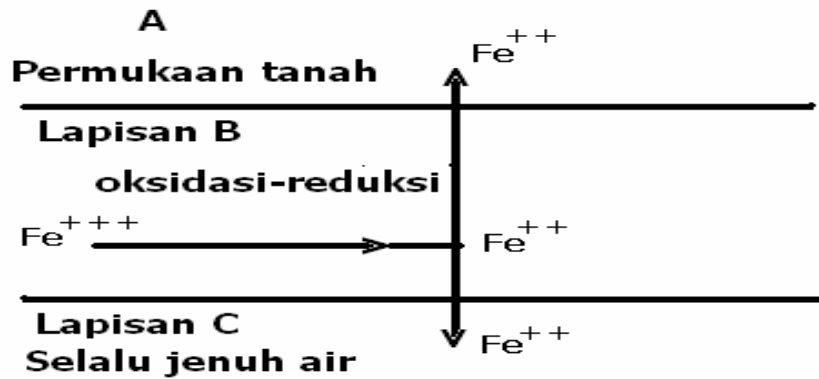
Gambar 3. Mekanisme perubahan besi oksida kristalin

Fenomena ini juga menjelaskan bagaimana terbentuknya karatan dan glei di tanah sawah. Menurut Fanning dan Fanning (1989) ada beberapa model yang dapat dipakai untuk menjelaskan pembentukan karatan dan glei pada tanah sawah, antara lain:

- Pada musim kering tanah sawah sering menjadi retak-retak dengan kedalaman yang bervariasi. Pada kondisi ini oksigen dapat masuk melalui retakan atau melalui lubang-lubang akar, sehingga Fe^{++} yang terbebaskan pada waktu penggenangan dan berada di permukaan retakan akan teroksidasi menjadi Fe^{+++} dan mengendap sebagai karatan dari oksida besi pada permukaan *ped* (butir struktur). Model semacam ini banyak dijumpai pada tanah sawah yang bersifat vertikal atau tanah sawah di daerah pasang surut, diantaranya pada waktu pembentukan jarosit.
- Ketika terjadi penggenangan lagi, oksida besi (karatan) yang dipermukaan butir struktur akan tereduksi, dan Fe^{++} yang terbawa air dapat meresap

masuk ke dalam struktur tanah, sehingga teroksidasi lagi dan terendapkan di bagian dalam dari butir struktur.

- Gambar 4 menunjukkan model sederhana yang menggambarkan proses pembentukan karatan dan warna glei pada tanah sawah. Lapisan B adalah lapisan yang sering mengalami proses bergantian antara oksidasi dan reduksi (lapisan olah). Pada waktu terendam air, Fe^{+++} yang tidak larut akan tereduksi menjadi Fe^{++} yang dapat larut dan mudah terbawa air hingga ke permukaan lapisan A (lapisan di bawah lapisan olah) dan lapisan C yang selalu jenuh air. Ketika kondisi oksidasi (kering) terjadi lagi, maka Fe^{++} akan mengendap sebagai Fe^{+++} yang berupa karatan, di lapisan B maupun dipermukaan tanah A. Akibatnya bila proses oksidasi reduksi berjalan terus-menerus maka tanah di lapisan B akan mempunyai warna kombinasi antara warna karatan dengan warna glei. Warna glei muncul dikarenakan ada bagian dari tanah di lapisan B yang menjadi kekurangan Fe, karena pada waktu reduksi Fe^{++} dari lapisan B banyak yang terangkut air.
- Pada lapisan C yang selalu jenuh air, proses yang terjadi hanyalah reduksi saja. Pada kondisi tidak terdapatnya kompleks anion organik dalam lapisan C, kelarutan Fe^{++} sangat rendah, bahkan bila pH nya $>6,5$ kelarutannya menjadi nol (Duchaufour, 1982). Selain itu kondisi reduksi juga menyebabkan tidak terdapatnya oksida besi, hanya akumulasi Fe^{++} yang terjadi sehingga tanah cenderung mempunyai kroma rendah dan berwarna kelabu (Fanning and Fanning, 1989) atau kelabu kehijauan.

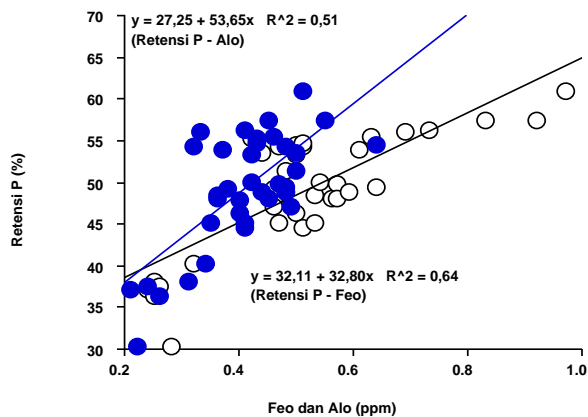


Gambar 4. Model sederhana yang menggambarkan proses pembentukan karatan dan pembentukan warna glei pada tanah sawah

Pengamatan morfologi pada tanah sawah bukaan baru yang merupakan konversi dari tanah kering di daerah Lampung belum menunjukkan adanya pembentukan warna glei di permukaan profil tanahnya (Prasetyo *et al.*, 1997). Belum terbentuknya warna glei pada tanah ini disebabkan karena pada waktu dilakukan pengamatan tanah sawah bukaan baru tersebut baru ditanami satu hingga dua kali, dan sistem pengairan di daerah tersebut masih belum memungkinkan untuk dapat bertanam padi 2-3 kali setahun.

Konversi tanah kering (Oxisol) menjadi tanah harus mewaspadai keberadaan mineral oksida besi dan perubahan-perubahan yang terjadi setelah tanah tersebut disawahkan. Sudah banyak penelitian yang menunjukkan adanya hubungan yang positif antara Al dan Fe dengan erapan P dalam tanah (Araki *et al.*, 1986, Bigham *et al.*, 1978). Hubungan antara sifat kimia tanah dengan erapan fosfat dari beberapa jenis tanah di Indonesia telah dikemukakan oleh Prasetyo *et al.* (2001). Berdasarkan penelitian tersebut dinyatakan bahwa Al yang diekstrak dengan amonium oksalat ternyata selalu mempengaruhi retensi P, baik pada

tanah sawah maupun tanah kering. Penelitian Puslittanak (1996, 1997) di daerah Lampung pada tanah sawah bukaan baru juga menunjukkan hal yang sama. Kandungan Al dan Fe yang diekstrak dengan amonium oksalat (Alo dan Feo) dari mineral oksida besi di daerah tersebut secara positif mempengaruhi besarnya retensi P dalam tanah (Gambar 5).



Gambar 5. Hubungan antara Feo dan Alo dengan retensi P pada tanah sawah bukaan baru di daerah Lampung Utara (Sumber: Puslittanak 1996, 1997)

KIMIA TANAH SAWAH

Penggenangan pada sistem usaha tani tanah sawah secara nyata akan mempengaruhi perilaku unsur hara esensial dan pertumbuhan serta hasil padi. Perubahan kimia yang disebabkan oleh penggenangan tersebut sangat mempengaruhi dinamika dan ketersediaan hara padi. Transformasi kimia yang terjadi berkaitan erat dengan kegiatan mikroba tanah yang menggunakan oksigen sebagai sumber energinya dalam proses respirasi

Keadaan reduksi akibat penggenangan akan merubah aktivitas mikroba

tanah dimana mikroba aerob akan digantikan oleh mikroba anaerob yang menggunakan sumber energi dari senyawa teroksidasi yang mudah direduksi yang berperan sebagai penerima elektron seperti ion NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{3+} , dan Mn^{4+} .

Terdapat tiga kelompok mikroba tanah yang sangat berperan dalam proses perubahan kimia tanah sawah yaitu mikroba aerob yang terdapat dalam lapisan atas tanah yang tipis disebut lapisan oksidasi, dan dalam air genangan yang memanfaatkan oksigen yang terdapat dalam air genangan. Pada lapisan tipis ini proses oksidasi secara biologis terjadi seperti misalnya oksidasi NH_4^+ menjadi NO_3^- atau S^{2-} menjadi SO_4^{2-} . Sedangkan lapisan di bawahnya disebut lapisan reduksi dimana hidup mikroba-mikroba fakultatif dan obligat anaerob yang mendapatkan sumber energinya melalui reduksi biologis dari senyawa-senyawa NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{3+} , dan Mn^{4+} menjadi NO_2^- , SO_2^{2-} , S^{2-} , Fe^{2+} , dan Mn^{2+} .

Perubahan-perubahan kimia tanah sawah ini yang berkaitan erat dengan proses oksidasi – reduksi (redoks) dan aktivitas mikroba tanah sangat menentukan tingkat ketersediaan hara dan produktivitas tanah sawah.

Kimia tanah sawah merupakan sifat tanah sawah yang sangat penting dalam hubungannya dengan teknologi pemupukan yang efisien. Aplikasi pupuk baik jenis, takaran, waktu maupun cara pemupukan harus mempertimbangkan sifat kimia tersebut. Sebagai contoh adalah teknologi nitrogen, dimana jenis, waktu dan cara pemupukannya harus memperhatikan perubahan perilaku hara N dalam tanah sawah agar pemupukan lebih efisien. Sumber pupuk N disarankan dalam bentuk amonium (NH_4^+), dimasukkan ke dalam lapisan reduksi dan diberikan 2-3 kali.

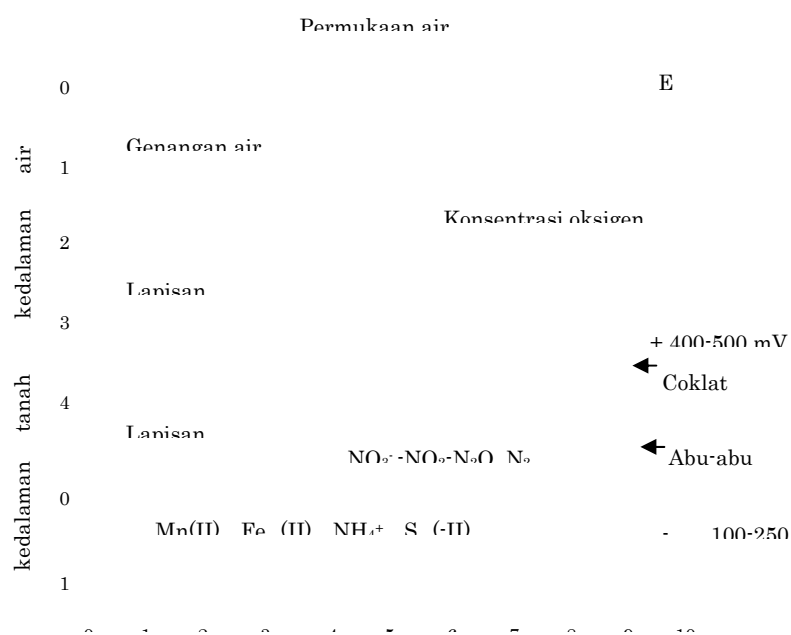
Perubahan potensial redoks

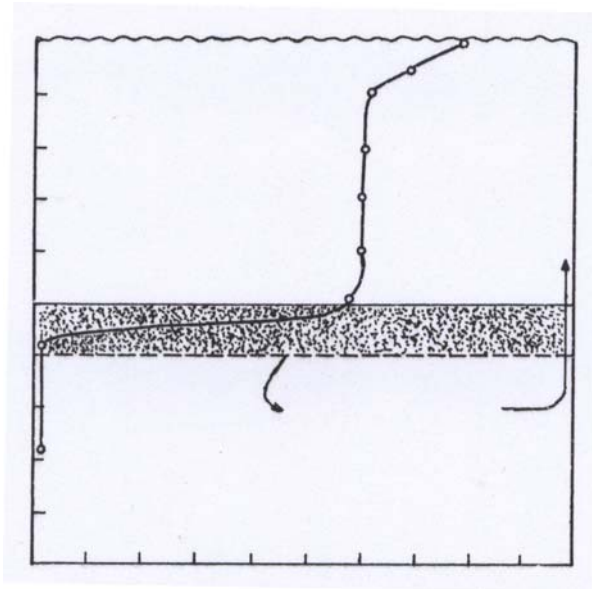
Bila tanah digenangi, persediaan oksigen menurun sampai mencapai nol dalam waktu kurang dari sehari (Sanchez, 1993; Reddy *et al.*, 1999). Laju difusi oksigen udara melalui lapisan air 10 ribu kali lebih lambat daripada melalui pori yang berisi udara. Mikroba aerob dengan cepat akan menghabiskan udara yang

tersisa dan menjadi tidak aktif lagi atau mati. Mikrobia fakultatif anaerob dan obligat aerob kemudian mengambil alih dekomposisi bahan organik tanah dengan menggunakan komponen tanah teroksidasi (seperti: nitrat, Mn, Fe-oksida, dan sulfat) atau hasil penguraian bahan organik (fermentasi) sebagai penerima elektron dalam pernafasan (Sanchez, 1993, Kyuma 2004).

Tanah yang tergenang tidak tereduksi secara keseluruhan. Pada lapisan atas setebal 2-20 mm, tetap teroksidasi karena berada dalam keseimbangan dengan oksigen yang terlarut dalam lapisan air. Lapisan dibawahnya merupakan lapisan tereduksi kecuali daerah perakaran yang aktif, karena daerah ini teroksidasi akibat dikeluarkannya senyawa teroksidasi oleh akar yang memperoleh oksigen dari bagian atas melalui aerenkhima (Yoshida, 1981). Pada penampang tanah nampak lapisan oksidasi berwarna kecoklatan dan lapisan reduksi dibawahnya berwarna abu-abu (gleyish) dengan sedikit bercak-bercak coklat kekuningan (Gambar 6).

Parameter yang dapat dipakai untuk mengukur dengan baik derajat anaerobiosis tanah dan tingkat transformasi biogeokimia yang terjadi adalah potensial redoks (nilai Eh dikoreksi pada pH 7) (Reddy *et al.*, 1999). Penggenangan tanah mengakibatkan penurunan potensial redoks. Nilai Eh turun dengan tajam dan mencapai minimum dalam beberapa hari, lalu naik dengan cepat mencapai suatu maksimum dan kemudian menurun secara asimtot (Sanchez, 1993).





Gambar 6. Pola distribusi oksigen pada tanah sawah dan bentuk-bentuk unsur utama mineral setelah stabilisasi (Sumber: Patrick dan Mikkelson, 1971)

Setelah oksigen dalam tanah tergenang habis, komponen tanah akan mengalami reduksi menurut urutan termodinamika sebagai berikut: nitrat, senyawa mangan, senyawa besi (feri), senyawa antara dari pelapukan bahan organik, sulfat dan sulfit. Reaksi reduksi utama yang terjadi pada tanah tergenang tertera pada Tabel 6 (Sanchez, 1993).

Tabel 6. Urutan termodinamika reaksi reduksi utama yang terjadi pada tanah tergenang

Tahap	Eh7 (mV)	Reaksi
0	800	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
1	430	$2NO_3^- + 12H^+ + 10e^- \rightarrow N_2 + 6H_2O$

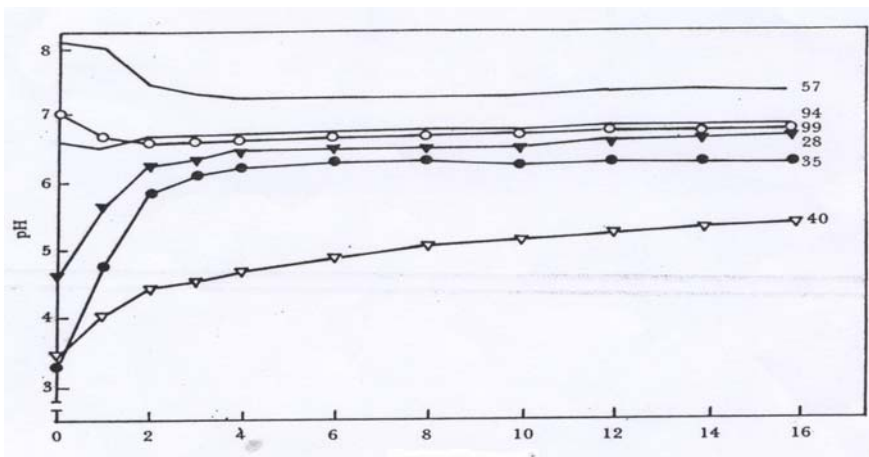
2	410	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
3	130	$\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$
4	-180	Asam organik (laktat, piruvat) + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ alkohol
5	-200	$\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{SO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$
6	-490	$\text{SO}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{e}^- \rightarrow \text{S}_2^{2-} + 6\text{OH}^-$

Yoshida (1981) menyatakan bahwa proses reduksi merupakan proses yang mengkonsumsi elektron (sehingga terjadi penurunan Eh) dan menghasilkan ion OH⁻ (sehingga pH meningkat) dan bentuk besi fero. Kecepatan reduksi dan macam serta jumlah hasil reduksi ditentukan oleh: (a) macam dan kandungan bahan organik; (b) macam dan konsentrasi zat anorganik penerima electron; (c) pH; dan (d) lamanya penggenangan (Yoshida, 1981). Menurut Sanchez (1993), kuatnya proses reduksi bergantung pada jumlah bahan organik yang mudah melapuk. Makin tinggi kandungan bahan organik tanahnya makin besar kekuatannya. Pada umumnya, kadar zat yang tereduksi mencapai puncak pada 2-4 minggu setelah penggenangan kemudian berangsur-angsur menurun sampai suatu tingkat keseimbangan.

Menurut Ponnampereuma (1985), besarnya nilai Eh berpengaruh terhadap ketersediaan unsur-unsur hara antara lain: Eh rendah meningkatkan ketersediaan P, K, Fe, Mn, dan Si tetapi mengurangi ketersediaan S dan Zn. Sulaeman *et al.* (1997) telah mempelajari pengaruh perubahan potensial redoks terhadap sifat erapan P tanah dan kelarutan untuk tanah sawah bukaan baru Petroferic Hapludox di Dorowati Lampung dan dilaporkan bahwa: (1) besi sudah mulai tereduksi pada Eh 400 mV dan memberikan kadar besi terlarut hingga 59 ppm pada Eh – 300 mV dan (2) kebutuhan pupuk P untuk mencapai 0,02 ppm P terlarut pada Eh sekitar 0 mV (nilai Eh yang umum berlaku pada masa pertumbuhan padi sawah) sebesar 95 dan 268 mg P kg⁻¹ tanah masing-masing untuk tanah lapisan atas dan bawah.

Perubahan pH tanah

Penggenangan pada tanah mineral masam mengakibatkan nilai pH tanah akan meningkat dan pada tanah basa akan mengakibatkan nilai pH tanah menurun mendekati netral (Gambar 7). Pada saat penggenangan pH tanah akan menurun selama beberapa hari pertama, kemudian mencapai minimum dan beberapa minggu kemudian pH akan meningkat lagi secara asimtot untuk mencapai nilai pH yang stabil yaitu sekitar 6,7–7,2. Penurunan awal disebabkan akumulasi CO₂ dan juga oleh terbentuknya asam organik. Kenaikan berikutnya bersamaan dengan reduksi tanah dan ditentukan oleh: (a) pH awal dari tanah; (b) macam dan kandungan komponen tanah teroksidasi terutama besi dan mangan; serta (c) macam dan kandungan bahan organik (Sutami dan Djakamihardja, 1990).



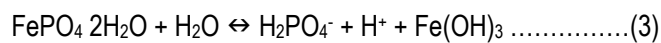
Lama penggenangan (minggu)

No. tanah	Tekstur	pH	BO %	Fe %	Mn %
28	Liat	4,9	2,9	4,70	0,08
35	Liat	3,4	6,6	2,60	0,01
40	Liat	3,8	7,2	0,08	0,00
57	Lempung berliat	8,7	2,2	0,63	0,07
94	Liat	6,7	2,6	0,96	0,09
99	Lempung berliat	7,7	4,8	1,55	0,08

Gambar 7. Perubahan pH tanah akibat penggenangan kinetika pH tanah dari enam jenis tanah yang tergenang (Ponnamperuma, 1972)

BO = Bahan organik

Pada tanah netral dan sedikit alkalis, pH diatur oleh keseimbangan CaCO_3 - CO_2 - H_2O dan pada tanah asam yang banyak mengandung besi diatur oleh keseimbangan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ - CO_2 - H_2 (Kyuma, 2004). Yamane (1978) menyatakan bahwa peningkatan pH pada tanah masam akibat penggenangan dikontrol oleh sistem Fe^{2+} - $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dimana terjadi konsumsi H^+ . Penggenangan tanah masam sama saja dengan tindakan pengapuran sendiri yaitu menyebabkan tercapainya kisaran pH optimum yang memungkinkan tersedianya hara secara optimum. Daya meracun dari aluminium hilang karena aluminium dapat ditukar terendapkan pada pH 5,5. Willet (1991) menyatakan bahwa meningkatkan pH tanah masam meningkatkan ketersediaan P karena meningkatnya kelarutan mineral P yaitu strengit ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan veriscit ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) seperti ditunjukkan pada reaksi berikut :



Perubahan besi tanah

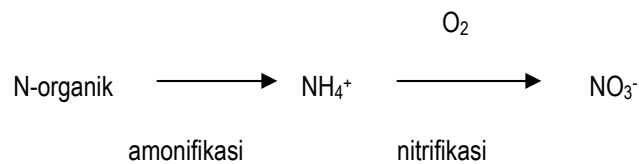
Reduksi besi adalah reaksi yang paling penting di dalam tanah masam tergenang karena dapat menaikkan pH dan ketersediaan fosfor serta menggantikan kation lain dari tempat pertukaran seperti K^+ . Peningkatan Fe^{2+} pada tanah masam dapat menyebabkan keracunan besi pada padi, apabila kadarnya dalam larutan =350 ppm. Keadaan ini dapat dihindari dengan cara pencucian tanah atau menanggihkan waktu tanam sampai melewati puncak reduksi. Puncak kadar senyawa Fe^{2+} larutan tanah biasanya terjadi dalam bulan pertama setelah penggenangan dan diikuti penurunan berangsur-angsur (Ponnamperuma, 1985). Konsentrasi besi dalam larutan tanah diatur oleh pH tanah, kandungan bahan organik, kandungan besi itu sendiri dan lamanya penggenangan (Ponnamperuma, 1985). Peningkatan pH tanah dari 4.5 ke 7.5 akibat penggenangan pada tanah Oxisols Sitiung secara nyata menurunkan

konsentrasi besi dalam larutan tanah dari 1.231 ke 221 mg Fe kg⁻¹ (Yusuf *et al.*, 1990). Adanya akumulasi besi yang berlebih dalam larutan tanah dapat menimbulkan keracunan bagi tanaman padi. Lu tian Ren (1985 *dalam* Yusuf *et al.*, 1990) menyebutkan batas kritis Fe larut air dalam larutan tanah untuk tanaman padi sekitar 50-100 ppm.

Perubahan nitrogen

Sebagian besar N tanah berupa N organik baik yang terdapat dalam bahan organik tanah maupun fiksasi N oleh mikroba tanah dan hanya sebagian kecil (2-5%) berupa N anorganik yaitu NH₄⁺ dan NO₃⁻ serta sedikit NO₂⁻. Pada tanah tergenang N merupakan hara yang tidak stabil karena adanya proses mineralisasi bahan organik (amonifikasi nitrifikasi dan denitrifikasi) oleh mikroba tanah tertentu.

Pada lapisan atas dimana oksigen masih cukup, proses mineralisasi akan menghasilkan NO₃⁻. Mineralisasi bahan organik:

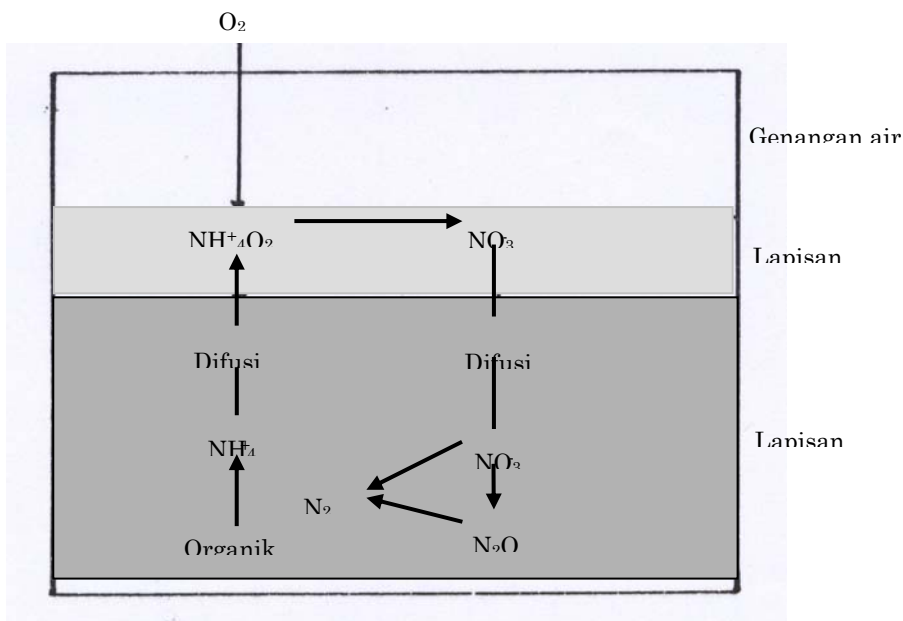


sedangkan pada lapisan dibawahnya yang sifatnya reduktif (tanpa oksigen) maka asimilasi akan berhenti sampai amonifikasi yaitu terbentuknya NH₄⁺. Nitrat (NO₃⁻) yang terbentuk di lapisan atas (lapisan oksidasi) sebagian akan berdifusi ke lapisan reduksi dan selanjutnya akan terjadi proses denitrifikasi, terbentuknya gas N₂O atau N₂ yang hilang ke udara (Gambar 8). Selain melalui proses denitrifikasi NO₃⁻ kehilangan N juga terjadi pada lapisan air yang pH nya tinggi melalui proses volatilisasi NH₃⁺. Penelitian Wetzelar di Sukamandi (1983) menunjukkan bahwa kehilangan N melalui kedua proses tersebut dapat mencapai 70%. Oleh karena itu pemupukan N harus diberikan ke dalam lapisan reduksi dengan beberapa kali

pemberian untuk mengurangi kehilangan N sehingga efisiensinya meningkat.

Perubahan fosfat

Respon tanaman terhadap pemupukan fosfat tidak sama antara padi sawah dengan tanaman tanah kering. Meskipun masalah kekahatan P tidak umum pada tanah sawah, namun Diamond (1985) menyatakan bahwa pada tanah Ultisol, Oxisol, Inceptisol tertentu dan sulfat masam, hal tersebut merupakan masalah penting untuk tanaman padi.



Gambar 8. Proses-proses yang terjadi pada waktu konversi nitrogen organik menjadi nitrogen elemen di dalam tanah yang tergenang dan endapan (Patrick an Reddy, 1978)

Ketersediaan P yang lebih besar pada kondisi tergenang dibandingkan dengan kondisi aerob umumnya disebabkan oleh perubahan redoks dalam tanah dan

resultan perubahan status Fe dalam tanah.

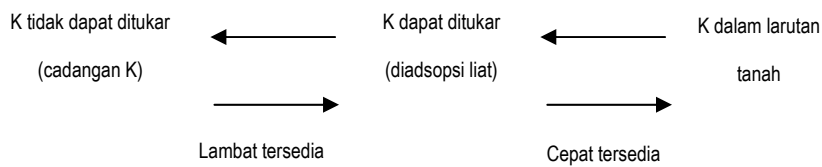
Pada awal penggenangan konsentrasi P dalam larutan tanah meningkat kemudian menurun untuk semua jenis tanah, tetapi nilai tertinggi dan waktu terjadinya bervariasi tergantung sifat tanah (Yoshida, 1981). Peningkatan ketersediaan P akibat penggenangan disebabkan oleh pelepasan P yang dihasilkan selama proses reduksi (Gambar 9). Mekanismenya adalah sebagai berikut:

1. Fosfor hanya dilepaskan apabila ferifosfat (Fe^{3+}) tereduksi menjadi ferofosfat (Fe^{2+}) yang lebih mudah larut. Willet (1991) menunjukkan reduksi feri oksida merupakan sumber yang dominan bagi pelepasan P selama penggenangan, walaupun sejumlah P yang dilepaskan akan diserap kembali. Pelepasan P yang berasal dari senyawa feri terjadi setelah reduksi mangan oksida.
2. Pelepasan *occluded* P akibat reduksi ferioksida yang menyelimuti P menjadi ferooksida yang lebih larut selama penggenangan. Penyelimutan P oleh feri oksida berada dalam liat dan zarah liat membentuk *occluded* P (Sanchez, 1993).
3. Adanya hidrolisis sejumlah fosfat terikat besi dan aluminium dalam tanah masam, yang menyebabkan dibebaskannya fosfor terjerap pada pH tanah yang lebih tinggi (Kyuma, 2004). Menurut Willet (1991), peningkatan pH tanah masam akibat penggenangan telah meningkatkan kelarutan strengit dan variscit dan selanjutnya terjadi peningkatan ketersediaan P. Sebaliknya ketika pH pada tanah alkalin menurun dengan adanya penggenangan, stabilitas mineral kalsium fosfat akan menurun, akibatnya senyawa kalsium fosfat larut (Willet, 1985).
4. Asam organik yang dilepaskan selama dekomposisi anaerob dari bahan organik pada kondisi tanah tergenang dapat meningkatkan kelarutan dari senyawa Ca-P maupun Fe-P dan Al-P melalui proses khelasi ketiga kation tersebut (Ca, Fe, Al).

5. Difusi yang lebih besar dari ion H_2PO_4^- ke larutan tanah melalui pertukaran dengan anion organik (Sanchez, 1993).

Perubahan hara K

Kalium (K) merupakan hara mobil, diserap tanaman dalam bentuk ion K^+ dari larutan tanah. Dalam tanah K yang terdapat dalam larutan tanah berada dalam bentuk keseimbangan dengan K yang diadsorpsi liat. Penurunan Eh akibat penggenangan akan menghasilkan Fe^{2+} dan Mn^{2+} yang dalam jumlah besar dapat menggantikan K yang diadsorpsi liat sehingga K dilepaskan ke dalam larutan dan tersedia bagi tanaman. Oleh sebab itu penggenangan dapat meningkatkan ketersediaan K tanah. Yoshida (1981) mengemukakan bahwa respon padi sawah terhadap pemupukan K umumnya rendah karena kebutuhan K dapat dicukupi dari cadangan mineral K yang berada dalam keseimbangan dengan K dalam larutan tanah dan air irigasi serta dekomposisi bahan organik. Pada tanah sawah yang drainasenya buruk sehingga potensial redoksnya sangat rendah, dapat terjadi kekahatan K. Hal ini karena daya oksidasi akar sekitar rizosfer sangat rendah serta adanya akumulasi asam-asam organik dalam larutan tanah yang dapat menghambat serapan K oleh akar (Yoshida 1981).



Perubahan hara S

Keadaan reduksi akibat penggenangan tanah sawah akan mengakibatkan terjadinya reduksi sulfat (H_2SO_4) menjadi sulfida (H_2S) yang bersifat racun

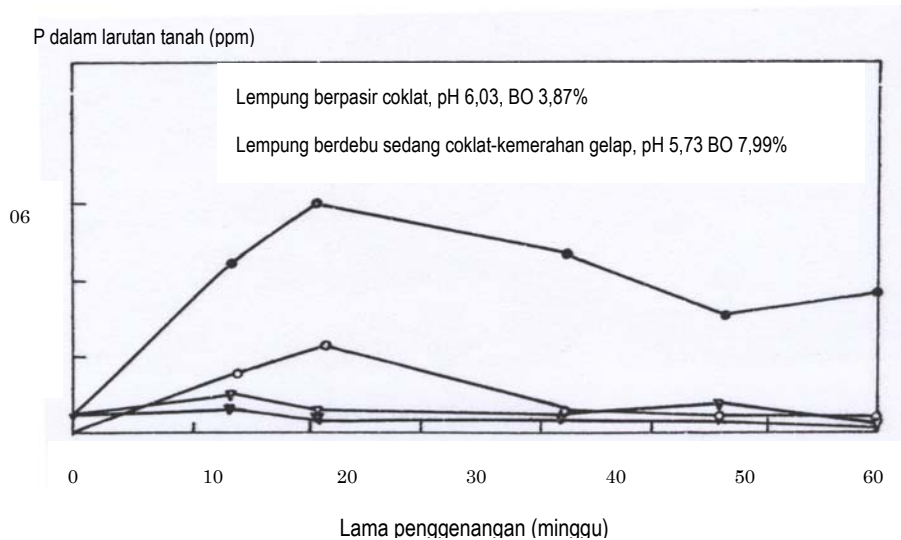
terhadap mikroba tanah dan tanaman padi. Dalam proses reduksi besi Fe^{3+} tereduksi terlebih dahulu menjadi Fe^{2+} menyusul kemudian SO_4^{2-} menjadi S^{2-} . Oleh sebab itu dalam larutan tanah selalu terdapat Fe^{2+} yang akan bereaksi dengan H_2S yang terbentuk akibat reduksi SO_4^{2-} dan terbentuk FeS yang mengendap. Proses ini akan melindungi mikroba tanah dan tanaman padi dari efek racun H_2S (Patrick and Reddy, 1978). Namun pada tanah gambut yang disawahkan produksi H_2S sangat berlebihan dan apabila kadar Fe^{2+} rendah maka akan terjadi pula keracunan H_2S . Reduksi yang sangat berlebihan atau pada tanah-tanah alkalin yang disawahkan dimana kadar besi rendah dapat juga terjadi kekahatan SO_4^{2-} karena berubah menjadi S^{2-} (Ponnamperuma, 1972).

Reduksi sulfat SO_4^{2-} menjadi sulfida S^{2-} dapat pula mengakibatkan terjadinya kekahatan unsur mikro Cu dan Zn karena terjadinya endapan CuS dan ZnS.

Perubahan unsur-unsur mikro Zn, Cu, dan Si

Sifat-sifat kimia hara-hara mikro seperti Zn, Cu, B, Mo, dan Si pada tanah sawah tidak terlalu banyak diteliti. Meskipun hara mikro tersebut tidak terlihat dalam proses oksidasi reduksi seperti Fe dan Mn, namun sifat-sifat dan ketersediaannya sangat dipengaruhi oleh potensial redoks.

Reduksi akan mengakibatkan ketersediaan Zn dan Cu dalam larutan tanah menurun. Penurunan kadar Zn dalam larutan tanah dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain (1) terbentuknya endapan Zn $(\text{OH})_2$ sebagai akibat meningkatnya pH setelah penggenangan (Lindsay, 1972); (2) terbentuknya endapan ZnCO_3 karena adanya akumulasi CO_2 hasil dekomposisi bahan organik; dan (3) terjadinya endapan ZnS karena adanya H_2S sebagai akibat reduksi berlebihan atau adanya endapan $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ karena adanya fosfat berlebihan. Oleh sebab itu kekahatan Zn pada tanah sawah tidak dapat diukur melalui kelarutan Zn namun perlu mempertimbangkan faktor-faktor lain yang mempengaruhinya (Yoshida, 1981).



Gambar 9. Perubahan konsentrasi fosfor terlarut dengan lamanya genangan (Ponnamperuma, 1965)

Penurunan kadar Cu dalam larutan umumnya hanya terjadi pada tanah yang sangat tereduksi yang disebabkan oleh terbentuknya endapan CuS atau kelasi Cu oleh asam-asam organik. Oleh sebab itu kekahatan Cu terjadi pada tanah-tanah tereduksi dengan bahan organik tinggi seperti gambut yang disawahkan.

Penggenangan pada tanah sawah akan meningkatkan ketersediaan silikon (Si). Hal ini diduga karena terlepasnya ion Si dari Fe dan Al amorph yang mengalami reduksi serta adanya kenaikan pH tanah yang tergenang (Mc Keague and Clene, 1963 *dalam* Patrick and Reddy, 1978). Kecuali itu kadar Silikon juga akan meningkat pada tanah dengan kadar bahan organik tinggi dan tanah yang berasal dari abu vulkan (Ponnamperuma, 1965).

SIFAT FISIK TANAH SAWAH

Sifat fisik tanah sangat menentukan kesesuaian suatu lahan dijadikan lahan sawah. Identifikasi dan karakterisasi sifat fisik tanah mineral memberikan informasi untuk penilaian kesesuaian lahan (Sys, 1985) terutama dalam hubungannya dengan efisiensi penggunaan air. Jika lahan akan disawahkan, sifat fisik tanah yang sangat penting untuk dinilai adalah tekstur, struktur, drainase, permeabilitas (Keersebilck and Soeprapto, 1985) dan tinggi muka air tanah (Sys, 1985). Sifat-sifat tersebut berhubungan erat dengan pelumpuran (*puddling*) dan efisiensi penggunaan air irigasi.

Identifikasi rezim kelembapan juga penting untuk membantu memformulasikan teknologi pengelolaan air. Contoh, tanah-tanah dengan rezim kelembapan *Aquic* sangat berpotensi untuk sawah non-irigasi (Eswaran, 1985) dan tidak terlalu penting untuk diolah dengan pelumpuran (Eswaran, 1985; Sharma and De Datta, 1985) karena ketersediaan air pada tanah-tanah ini tergolong tinggi sepanjang tahun.

Tanah sawah beririgasi umumnya diolah dengan cara pelumpuran (*puddling*). Pengaruh pelumpuran terhadap sifat fisik tanah menjadi sangat spesifik pada lahan sawah dan sekaligus memberikan indikasi perbedaan perubahan sifat fisik tanah antara tanah yang disawahkan dengan tanah yang tidak disawahkan.

Tekstur tanah

Tanah yang bertekstur halus bila terdispersi akan mampu menutup pori di bawah lapisan olah. Kondisi ini akan mempercepat terbentuknya lapisan tapak bajak (*plowpan*) yang berpermeabilitas lambat. Kemampuan membentuk lapisan tapak bajak ini penting untuk tanah-tanah dengan rezim kelembapan *Udic* dan *Ustic*. Lapisan tapak bajak ini sangat penting terutama untuk sawah beririgasi, agar air irigasi tidak mudah hilang melalui perkolasi ke lapisan bawah sehingga penggunaan air irigasi menjadi efisien.

Tekstur tanah sedang sampai agak halus sesuai untuk tanaman lahan kering karena tanah tersebut mudah diolah, memiliki kapasitas menahan air (*water holding capacity*) yang relatif tinggi, dan drainase cepat. Tanah dengan tekstur agak berat seperti lempung halus, debu halus, dan liat halus sangat cocok untuk disawahkan. Tanah-tanah dengan kandungan liat 25-50% pada lapisan tanah atas (*top soil*) dan tekstur yang sama atau lebih tinggi pada lapisan bawah (*subsoil*) sangat mendukung peningkatan hasil padi (Grant *dalam* Prihar *et al.*, 1985).

Tanah bertekstur kasar pada lapisan tanah atas kurang sesuai untuk tanaman padi karena tanah tersebut memiliki laju perkolasi yang cepat, tidak efisien dalam penggunaan air, dan kehilangan hara pada tanah ini tergolong tinggi. Demikian halnya jika tanah-tanah ini digunakan untuk tanaman yang lain karena umumnya tanah ini memiliki KTK yang rendah, kandungan hara rendah dan kemampuan menahan air yang juga rendah. Namun demikian jika tanah lapisan bawah bertekstur halus, maka tanah-tanah tersebut masih memungkinkan untuk disawahkan (Prihar *et al.*, 1985). Hal ini berimplikasi pada pengelolaan tanaman pada lahan sawah, dimana tidak saja padi tetapi tanaman lain dalam sistem pergiliran atau tumpang gilir. Harwood *dalam* Prihar *et al.* (1985) menggolongkan tanah berdasarkan teksturnya yang memungkinkan tanah sawah dikelola juga untuk tanaman lain (Tabel 7).

Tabel 7. Tanah sawah dengan berbagai tekstur dan potensinya untuk pengembangan berbagai tanaman dengan kondisi air yang berbeda (Harwood *dalam* Prihar *et al.*, 1985)

		Tekstur tanah			
		Lempung berpasir	Lempung berdebu	Lempung berliat*	Liat*
		Lempung berdebu	Lempung berliat**	Liat**	
		Persen kenaikan berat isi oleh pelumpuran			
		< 4	4-8	8-12	> 12
Tanaman	irigasi	Tanaman setelah padi			
Kc.Tanah	Kurang	Baik	Sedang	Jelek	Jelek
	Cukup	Baik	Baik	Sedang	Jelek

Jagung	Kurang	Baik	Sedang	Jelek	Jelek
	Cukup	Baik	Baik	Sedang	Jelek
Sorgum	Kurang	Baik	Baik	Sedang	Jelek
	Cukup	Baik	Baik	Baik	Sedang
Kedelai	Kurang	Baik	Baik	Baik	Sedang
	Cukup	Baik	Baik	Baik	Baik
Kc.Merah	Kurang	Baik	Baik	Baik	Sedang
	Cukup	Baik	Baik	Baik	Baik
Cowpea	Kurang	Baik	Baik	Baik	Baik
	Cukup	Baik	Baik	Baik	Baik

* Liat 2:1, ** Liat 1:1

Pengaruh pengolahan tanah terhadap proporsi tekstur pada berbagai lapisan tanah telah diteliti oleh Lal (1981) pada tanah bertekstur kasar di Nigeria. Tanah yang dilumpurkan (*puddling*) memiliki kandungan pasir yang lebih banyak dari liat dan debu pada 0-1 cm tanah permukaan dibanding jika tanah tidak dilumpurkan (Tabel 8).

Tabel 8. Pengaruh cara pengolahan tanah terhadap proporsi tekstur tanah pada tanah bertekstur kasar di Nigeria (Lal, 1981, data tidak dipublikasi)

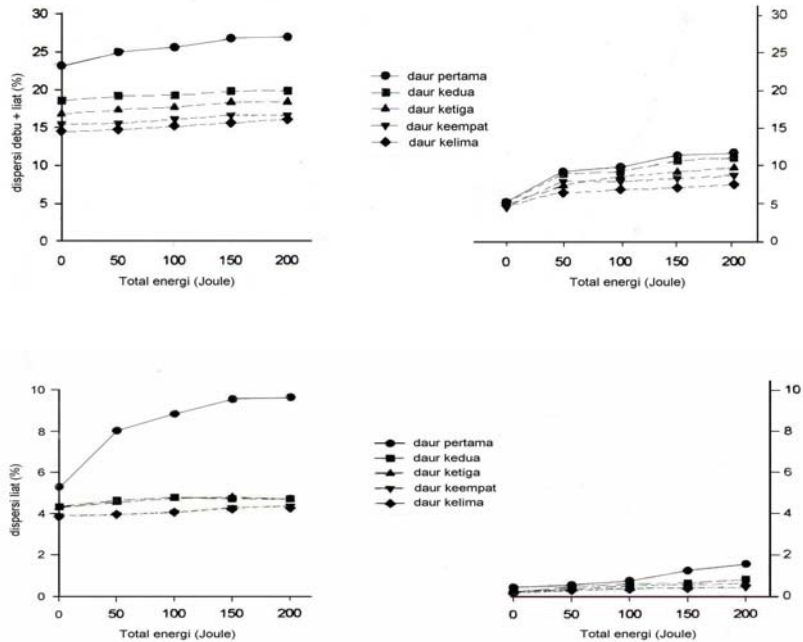
Tekstur tanah	Proporsi tekstur					
	Pelumpuran			Tidak diolah		
	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm
	%					
Pasir	32	30	31	28	28	30
Debu	33	33	32	34	34	33
Liat	35	37	37	38	38	37

Pelumpuran (*puddling*) juga berpengaruh terhadap persentase bahan terdispersi, dan sangat tergantung pada komposisi tekstur tanah. Pengaruh intensitas pelumpuran terhadap rata-rata material terdispersi disajikan pada Gambar 10. Secara umum rata-rata material terdispersi meningkat menurut intensitas pelumpuran.

Struktur tanah

Pengaruh jangka pendek dari pelumpuran telah diuraikan oleh Sharma dan De Datta (1985). Pengolahan tanah dengan cara pelumpuran menghancurkan agregat tanah. Pada kondisi tergenang agregat tanah akan terdispersi dan penghancuran agregat akan semakin intensif pada saat tanah dibajak, digaru dan dilumpurkan. Jika tanah dilumpurkan, tiap lapisan pada zona pelumpuran memiliki karakteristik yang berbeda dengan lapisan yang lainnya. Hasil penelitian Saito dan Kawaguchi (1971) *dalam* Sharma dan De Datta (1985) menunjukkan bahwa pada lapisan tanah permukaan 0-15 cm pada zona pelumpuran tersusun oleh tanah dengan tekstur yang halus, lapisan tengah dengan tekstur yang agak kasar dan lapisan bawah dari zona tersebut sangat masif tanpa ada perbedaan tekstur.

Menurut Chaudhary dan Ghildyal (1969), pelumpuran mengurangi diameter rata-rata agregat dari 1,70 mm menjadi 0,36 mm. Dari penelitiannya di laboratorium menggunakan agregat tanah berukuran lebih kecil dari pasir kasar menunjukkan bahwa akibat pelumpuran 40% agregat tanah hancur menjadi fraksi tanah berukuran <0,05 mm.



Gambar 10. Pengaruh intensitas pelumpuran terhadap dispersi debu dan liat

Bobot isi (*bulk density*)

Pada lahan sawah beririgasi di mana pengolahan tanah dilakukan dengan cara dilumpurkan, akan berpengaruh pada bobot isi tanah. Intensitas pelumpuran memberikan pengaruh yang berbeda terhadap bobot isi tanah. Dari hasil penelitian pada tanah sawah bukaan baru, Subagyono *et al.* (2001) pelumpuran menurunkan bobot isi tanah bertekstur liat, liat berdebu dan lempung berliat dengan 11%, 16%, 10% dan 27%, 23%, 12% berturut-turut pada tanah yang dilumpurkan sekali dan dua kali. Pelumpuran dua kali pada tanah bertekstur lempung liat berpasir menurunkan bobot isi hingga 26% (Tabel 9). Meningkat dan menurunnya bobot isi dapat terjadi tergantung pada agregat tanah sebelum tanah dilumpurkan. Menurut Ghildyal (1978) pelumpuran pada tanah dengan agregat yang mantap dan porus menghasilkan agregat yang masif dengan bobot isi yang

meningkat. P0 pada perlakuan yang dicobakan menggambarkan kondisi jika tanah tidak disawahkan. Dengan demikian tanah yang disawahkan bobot isi tanah cenderung menurun dibanding jika tanah tidak disawahkan.

Bobot isi tanah sangat ditentukan oleh tekstur dan mineral tanah. Pada tanah dengan mineral campuran umumnya memiliki bobot isi yang lebih tinggi dibanding dominasi satu mineral seperti mineral Illit (Tabel 9). Setelah pelumpuran, penurunan bobot isi tanah juga sangat bervariasi tergantung pada tekstur dan tipe mineral liatnya.

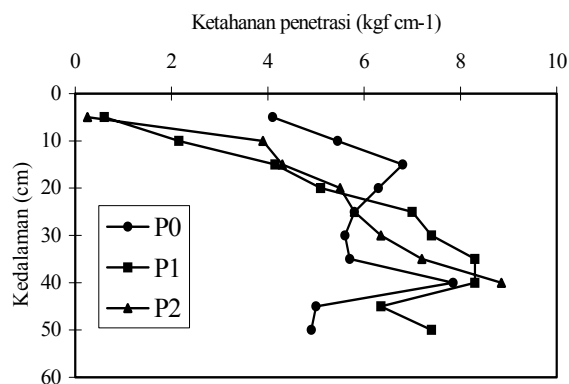
Tabel 9. Pengaruh pelumpuran terhadap bobot isi tanah pada kedalaman 20 cm (Subagyono *et al.*, 2001)

Tekstur tanah (mineral)	Bobot isi		
	P0	P1	P2
	g cm ⁻³		
Liat (illitic)	1,00	0,89	0,84
Liat berdebu (mineral campuran)	1,31	1,18	0,95
Liat berpasir (mineral campuran)	0,86	td	0,87
Lempung liat berpasir (mineral campuran)	1,33	td	0,98
Lempung berdebu (mineral campuran)	1,55	1,20	1,37

P0 = tidak diolah; P1= dilumpurkan sekali; P2= dilumpurkan dua kali; td = tidak diukur

Ketahanan tanah (*soil strength*)

Tanah sawah beririgasi umumnya memiliki ketahanan penetrasi yang relatif rendah di lapisan tanah atas dan meningkat pada lapisan tanah yang lebih dalam. Pengolahan tanah dengan pelumpuran sangat mempengaruhi variabilitas vertikal ketahanan penetrasi. Subagyono *et al.* (2001) melaporkan bahwa tanah yang dilumpurkan memiliki ketahanan penetrasi yang lebih rendah hingga kedalaman kurang lebih 25 cm dibanding jika tanah tidak diolah (Gambar 11). Hal ini memberikan indikasi bahwa tanah yang disawahkan (P1 dan P2) akan memiliki ketahanan (*soil strength*) yang lebih rendah dibanding dengan jika tanah tidak



disawahkan (P0). Menurut Sharma dan De Datta (1985) penurunan ketahanan penetrasi pada 0-10 cm dari 1,1 Mpa menjadi 0 Mpa meningkatkan hasil padi dari 3,6 menjadi 5,5 t ha⁻¹.

Gambar 11. Pengaruh pelumpuran terhadap ketahanan penetrasi pada tanah liat berdebu Sumber: Subagyono *et al.* (2001) P0: tanpa pelumpuran; P1: pelumpuran sekali; P2: pelumpuran dua kali

Penurunan ketahanan tanah terhadap penetrasi pada tanah yang dilumpurkan disebabkan oleh kandungan air yang lebih tinggi dibanding tanah yang tidak diolah. Hasil yang sama telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya, bahwa ketahanan tanah terhadap penetrasi (*soil strength*) berubah dengan berubahnya tegangan air dan kandungan air tanah (Nearing *et al.*, 1988; Williams and Shaykewish, 1970; Towner, 1961; Gill, 1959; Gerard, 1965; Camp and Gill, 1969).

Permeabilitas

Akibat agregat tanah yang hancur oleh pengolahan tanah dengan pelumpuran, porositas dan distribusi pori juga berubah. Hal ini berakibat pada menurunnya kemampuan tanah melalukan air. Pada Tabel 10 disajikan data konduktivitas hidrolis beberapa jenis tanah oleh pengaruh pengolahan tanah dengan cara dilumpurkan.

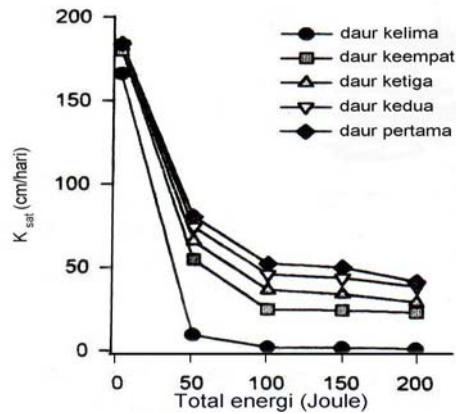
Tabel 10. Pengaruh pelumpuran terhadap konduktivitas hidrolis pada kedalaman 20 cm pada berbagai jenis tanah (Subagyono *et al.*, 2001)

Jenis tanah	Konduktivitas hidrolis		
	P0	P1	P2
	————— m day ⁻¹ —————		
Liat (illitic)	0.18	0.07	0.07
Liat berdebu (mineral campuran)	0.31	0.30	0.29
Liat berpasir (mineral campuran)	0.58	nd	0.08
Lempung liat berpasir (mineral campuran)	0.47	nd	0.29
Lempung berdebu (mineral campuran)	0.33	nd	0.08

P0 = tidak diolah; P1= dilumpurkan sekali; P2= dilumpurkan dua kali; nd = tidak diukur

Pelumpuran dua kali menurunkan permeabilitas tanah relatif lebih tinggi

dibanding pelumpuran sekali. Tingkat kehancuran agregat tanah dan porositas serta distribusi pori sangat ditentukan oleh intensitas pengolahan tanah dengan cara pelumpuran. Intensitas pelumpuran juga berpengaruh pada perubahan permeabilitas tanah (Gambar 12). Konduktivitas hidrolik jenuh menurun dengan meningkatnya intensitas pelumpuran (energi pelumpuran meningkat). Secara umum tanah yang disawahkan akan menurun nilai konduktivitas hidroliknya dan relatif lebih rendah daripada nilai konduktivitas hidrolik tanah yang tidak disawahkan. Hal ini disebabkan oleh menurunnya ruang pori total akibat pengolahan tanah dengan cara pelumpuran.



Gambar 12. Pengaruh intensitas pelumpuran terhadap perubahan konduktivitas hidrolik (K_{sat}) tanah sawah

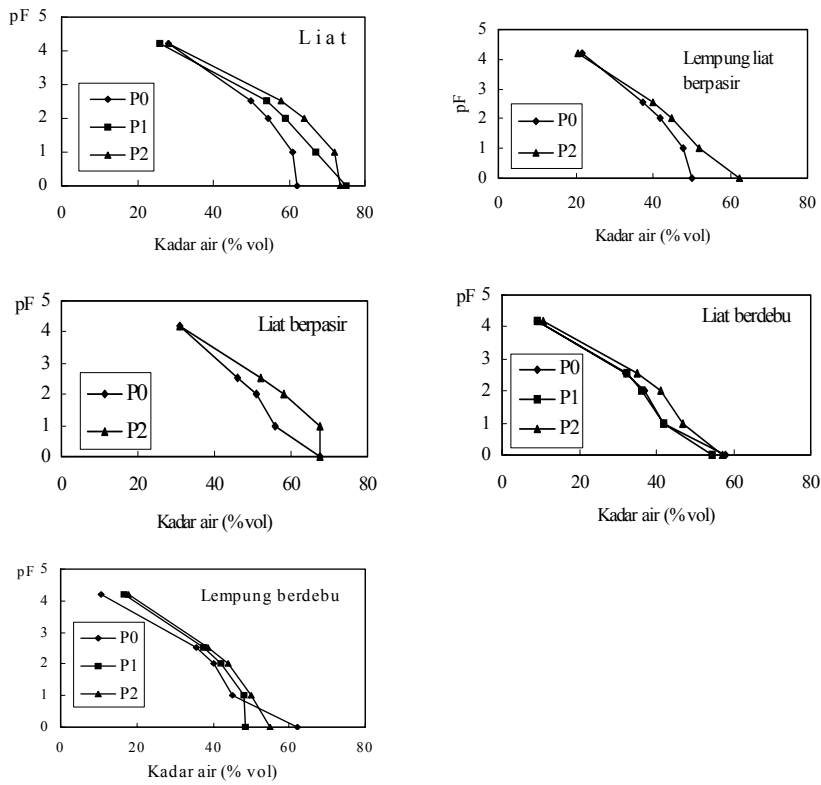
Kurva karakteristik air tanah

Kemampuan menahan air pada tanah yang dilumpurkan lebih tinggi dibanding tanah yang tidak dilumpurkan (Gambar 13). Hal ini artinya bahwa pelumpuran meningkatkan kemampuan tanah menahan air (*water holding capacity*), sekaligus menunjukkan bahwa tanah yang disawahkan akan meningkatkan kemampuannya dalam menahan air. Tanah yang dilumpurkan dua kali memiliki retensi air yang paling tinggi dibanding tanah yang tidak dilumpurkan dan tanah yang dilumpurkan sekali. Hal ini diduga disebabkan oleh tekstur tanah dan

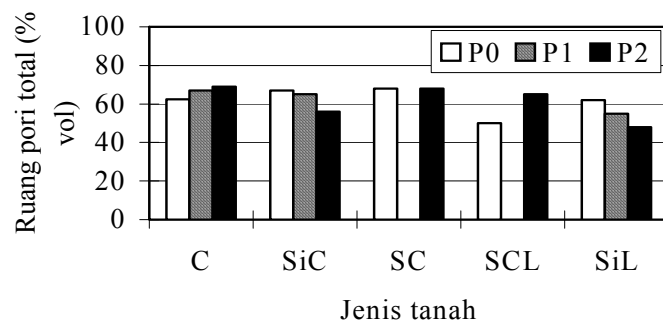
komposisi mineraloginya. Tanah dengan mineral 2:1 Illit menunjukkan perbedaan yang sangat besar antara tanah yang dilumpurkan dengan tanah yang tidak dilumpurkan.

Porositas tanah

Pengolahan dengan pelumpuran pada tanah sawah menurunkan total porositas tanah. Subagyono *et al.* (2001) melaporkan bahwa pelumpuran menurunkan porositas tanah dengan tekstur liat berdebu dan lempung liat berpasir (Gambar 14). Hal ini menunjukkan bahwa tanah yang disawahkan akan menurunkan ruang pori totalnya dan relatif lebih rendah dibanding jika tanah tidak disawahkan. Penurunan porositas total ini sangat ditentukan oleh struktur tanah sebelum dilumpurkan. Jika pelumpuran merubah struktur tanah dari struktur yang mantap ke struktur yang lebih kompak, porositas tanah akan berkurang.

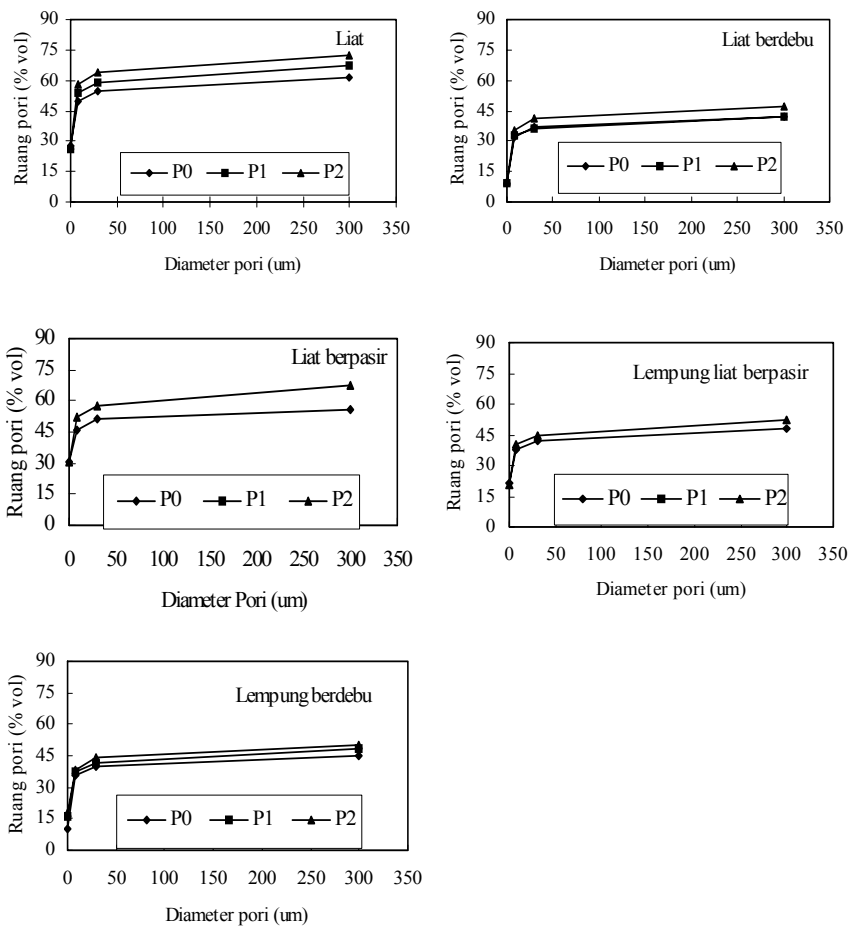


Gambar 13. Pengaruh pelumpuran terhadap kurva karakteristik air tanah pada berbagai jenis tanah (Subagyono *et al.*, 2001)



Gambar 14. Pengaruh pelumpuran terhadap ruang pori total tanah sawah (Subagyono *et al.*, 2001). C=liat; SiC=liat berdebu; SC=liat berpasir; SCL=lempung liat berpasir; SiL=lempung berdebu

Pengaruh pelumpuran terhadap distribusi ukuran pori pada berbagai jenis tanah disajikan pada Gambar 15. Secara umum pori mikro ($<30 \mu\text{m}$), meso ($30-100 \mu\text{m}$) dan makro ($>100 \mu\text{m}$) meningkat dengan pelumpuran kecuali pada tanah bertekstur liat berdebu dan lempung berdebu. Pengaruh pelumpuran terhadap penurunan ruang pori total ini sama dengan hasil yang diperoleh Sharma dan De Datta (1985). Mereka melaporkan bahwa pelumpuran menurunkan pori berukuran $>30 \mu\text{m}$ (*transmission pores*) hingga 83% dan meningkatkan pori berukuran $0,6 - 30 \mu\text{m}$ (*storage pores*) dan $< 0,6 \mu\text{m}$ (*residual pores*) hingga 7% dan 52%.



Gambar 15. Pengaruh pelumpuran terhadap distribusi ukuran pori pada berbagai tekstur tanah (Subagyono *et al.*, 2001)

Pori aerasi pada tanah liat berdebu, liat berpasir, dan lempung berdebu menurun akibat dilumpurkan, tetapi pada tanah lempung liat berpasir jumlah pori aerasi tersebut meningkat (Gambar 15). Hasil yang pertama terjadi jika akibat pelumpuran pada tanah terbentuk struktur yang kompak/mampat, tetapi hasil kedua juga bisa terjadi jika pelumpuran menghasilkan lebih banyak struktur tanah yang terbuka (tidak kompak).

Perubahan pada sifat fisik tanah akibat pengolahan tanah dengan cara dilumpurkan (*puddling*) memberikan indikasi yang sangat penting dalam menyusun strategi pengelolaan tanah dan air di lahan sawah. Pelumpuran sebagai suatu cara pengolahan tanah yang spesifik untuk tanah sawah tidak saja memberikan pengaruh positif dalam menekan laju perkolasi karena lapisan tapak bajak yang terbentuk, tetapi juga harus diperhatikan pengaruh negatifnya. Dengan demikian beberapa integrasi komponen teknologi yang mampu mengurangi akibat buruk pelumpuran bias dilakukan, sebagai contoh pemberian bahan organik.

Dengan mempertimbangkan meneralogi tanah sawah, formulasi

teknologi pengelolaan tanah dan air akan lebih komprehensif. Pada dasarnya liat dengan mineral 2:1 (illit, montmorilonit) memiliki kemampuan menahan air yang cukup tinggi dibanding tanah dengan tipe mineral 1:1 (kaolinit, haloisit) dan ini sangat berimplikasi terhadap penerapan pengelolaan air di lahan sawah terutama dalam aspek efisiensi irigasi. Namun demikian harus juga diperhatikan bahwa kemampuan mengembang dan mengkerut tanah dengan mineral 2:1 cukup tinggi yang akan berdampak fatal terhadap pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu kadar air pada tanah sawah dengan tipe mineral tersebut harus dipertahankan pada level dimana proses mengembang dan mengkerut tidak terlalu besar.

Biologi tanah sawah

Ekosistem sawah

Tanah sawah yang dimaksud dalam tulisan ini adalah tanah yang digunakan atau potensial dapat digunakan untuk menanam padi sawah sekali atau lebih selama setahun. Istilah tanah sawah berkaitan dengan tataguna tanah, bukan dengan jenis tanah tertentu dalam pengertian pedologi.

Sawah adalah suatu ekosistem buatan dan suatu jenis habitat khusus

yang mengalami kondisi kering dan basah tergantung pada ketersediaan air. Karakteristik ekosistem sawah ditentukan oleh penggenangan, tanaman padi, dan budi dayanya. Sawah tergenang biasanya merupakan lingkungan air sementara yang dipengaruhi oleh keragaman sinar matahari, suhu, pH, konsentrasi O₂, dan status hara (Watanabe and Roger, 1985).

Penanaman padi sawah secara tradisional sangat berhasil melestarikan produktivitas lahan. Selama beribu-ribu tahun sistem padi sawah telah berhasil mempertahankan tingkat hasil padi yang moderat tetapi stabil tanpa menimbulkan kerusakan lingkungan (Bray, 1986). Hal ini terjadi karena penggenangan meningkatkan kesuburan tanah dan produksi padi dengan jalan: (1) menaikkan pH tanah mendekati netral; (2) meningkatkan ketersediaan hara, terutama P dan Fe; (3) memperlambat perombakan bahan organik tanah; (4) menguntungkan penambahan N₂; (5) menekan timbulnya penyakit terbawa tanah; (6) memasok hara melalui air irigasi; (7) menghambat pertumbuhan gulma tipe C₄; dan (8) mencegah perkolasi air dan erosi tanah.

Pengolahan tanah, pindah tanam, dan pengendalian gulma telah merusak stabilitas komunitas, sehingga terbentuklah fauna dan struktur komunitas khusus sawah. Penggenangan telah menciptakan kondisi anaerob beberapa mm di bawah permukaan tanah. Kondisi ini menghasilkan enam lingkungan utama yang dibedakan berdasarkan sifat-sifat fisik, kimia dan trofik, yaitu: (1) air genangan; (2) tanah oksidasi permukaan; (3) tanah reduksi; (4) lapisan olah; (5) *subsoil*, dan (6) tanaman padi (bagian yang terendam) dan rizosfirnya. Secara diagram keenam lingkungan dapat dilihat pada Gambar 18, modifikasi dari Roger (1996).

1. *Air genangan merupakan lingkungan aerobik fotik dimana produsen fotosintetik dan khemosintetik komunitas air (bakteri, alga, dan gulma air), konsumen primer invertebrata dan vertebrata (grazer), dan konsumen sekunder (insekta karnivor dan ikan) menyediakan bahan organik ke tanah dan mendaur ulang hara. Pertukaran yang terus-menerus antara lingkungan air genangan dan tanah oksidasi oleh Watanabe dan Furusaka (1980) dianggap sebagai suatu continuum.*
2. Lapisan tanah oksidasi permukaan merupakan lingkungan aerobik fotik

dengan redok potensial positif, tebalnya beberapa mm, dimana NO_3^{-1} , Fe^{+3} , SO_4^{-2} , dan CO_2 stabil, dan dimana alga dan bakteri aerobik tumbuh dominan. Kedalaman lapisan oksidasi biasanya 2-20 mm dan tergantung pada konsentrasi O_2 terlarut dalam air genangan, kapasitas reduksi tanah, dan aktivitas *benthos* dan fauna tanah.

3. Lapisan tanah reduksi merupakan lingkungan anaerobik nonfotik, di mana redok potensial terutama negatif. Proses reduksi merupakan proses utama yang menghasilkan NH_4^+ , sulfida, asam organik dan CH_4 , dan aktivitas mikrobial dipusatkan dalam agregat tanah yang mengandung sisa bahan organik. Perombakan bahan organik pada lapisan reduksi melestarikan populasi cacing, *oligochaete* air dan larva *chironomid*. Hewan-hewan yang mendiami zona ini kerap kali mengandung hemoglobin atau memiliki kantong udara untuk adaptasi terhadap konsentrasi O_2 rendah.
4. Lapisan tapak bajak memperlihatkan permeabilitas yang rendah dan bobot isi yang tinggi, dan kekuatan mekanik yang lebih besar dibandingkan dengan lapisan-lapisan lain. Lapisan olah ini mencegah kehilangan hara dan air yang disebabkan oleh pencucian dan perkolasi.
5. Lapisan subsoil terletak di bawah lapisan olah, aerobik pada tanah-tanah yang berdrainase baik dan anaerobik pada tanah-tanah yang berdrainase buruk. Secara mikrobiologis lapisan *subsoil* paling atas aktif dan berperan menyediakan hara bagi tanaman padi, khususnya N (Ventura and Watanabe, 1984).
6. Tanaman padi terutama mempengaruhi air genangan dan tanah permukaan melalui efek naungannya, yang meningkat dengan membesarnya kanopi padi. Perubahan intensitas cahaya yang terjadi mempengaruhi pertumbuhan organisme-organisme yang foto-dependen (tergantung pada cahaya). Tanaman padi juga secara tidak langsung mempengaruhi air tergenang dan komunitas-komunitas tanah dengan jalan menurunkan suhu dan konsentrasi CO_2 di bawah kanopi. Pengurangan radiasi matahari dengan tingkat CO_2 yang rendah pada hari-hari yang cerah akan mempengaruhi laju pertumbuhan, suksesi, dan mungkin juga distribusi organisme ototrofik. Tanaman padi berperan sebagai substrat bagi pertumbuhan epifitik (Roger *et al.*, 1981). Dan memberikan topangan mekanis bagi banyak spesies hewan. Misalnya keong bisa menghindari suhu air yang tinggi dengan jalan menempel pada batang padi pada batas udara/air tergenang.

Rizosfir padi merupakan lingkungan yang fotik, dimana kondisi redok ditentukan oleh keseimbangan antara kapasitas oksidasi dan reduksi akar padi, dan di mana produksi senyawa-senyawa C akar menyediakan sumber energi bagi pertumbuhan mikroba. Tanaman padi dapat memasok oksigen molekul ke akar melalui sistem transpor udara yang berkembang pada tanaman padi sawah (Van Raalte, 1941; Barber *et al.*, 1962) dan difusi O₂ dari atmosfer ke lapisan tanah terdekat menyebabkan batas oksidasi/reduksi berbeda. Akar padi dapat mengoksidasi lapisan rizosfir yang tipis. Tanaman padi dapat menempati volume tanah yang besar, karena itu bagian signifikan tanah yang ditanami mungkin aerobik dan larutan tanah dapat mempertahankan potensi redok yang tinggi. Aktifitas utama yang berlangsung pada rizosfir adalah: (1) penambatan N₂ secara hayati oleh bakteri heterotrof dan asosiatif; (2) nitrifikasi-denitrifikasi; dan (3) reduksi sulfat (Watanabe and Furasaka, 1980).

Flora dan fauna sawah

Berbagai flora dan fauna terlibat dalam proses biologis yang berlangsung pada lahan sawah, yang menyangkut kesuburan dan produktivitas lahan sawah maupun sebagai hama dan penyakit bagi tanaman padi.

Flora sawah

Penggenangan mengubah karakter mikroflora dalam tanah. Jumlah mikroflora pada tanah-tanah yang digenangi pada beberapa negara (Jepang, India, Mesir, dan Filipina) didominasi oleh bakteri, sedangkan fungi dan aktinomiset lebih banyak pada tanah-tanah kering (Yoshida, 1978). Rizosfir biasanya mengandung jumlah bakteri yang lebih tinggi dari tempat lain dalam tanah. Bakteri yang dominan pada rizosfir padi adalah *Mycobacteria*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* (Ch'en cit. Yoshida, 1978). Tanah sawah adalah habitat yang sangat unik untuk penambatan nitrogen secara hayati. Mikroba penambat nitrogen hidup bebas yang terdapat pada tanah sawah dapat digolongkan menjadi

dua kelompok besar, yaitu kelompok heterotrofik dan autotrofik. Kelompok heterotrofik merupakan kelompok yang tergantung pada sumber senyawa organik eksternal sebagai sumber karbonnya, sedangkan kelompok autotrofik menggunakan CO₂ sebagai sumber utama karbonnya.

Kelompok autotrof dapat dibedakan menjadi dua subkelompok, yaitu kemoautotrof dan fotoautotrof. Kemoautotrof menggunakan energi yang tersimpan pada molekul anorganik (seperti amonia, hidrogen sulfida, atau nitrit) untuk mengubah CO₂ menjadi senyawa organik, sedangkan fotoautotrof menggunakan energi matahari untuk melakukan perubahan ini. Tabel 11 menunjukkan daftar dari mikroba penambat nitrogen hidup bebas (diazotrof) fotoautotrofik dan heterotrofik (Watanabe, 1978).

Tabel 11. Daftar mikroba penambat nitrogen hidup bebas

.Diazotrof	Contoh
Fotoautotrofik	Alga biru hijau Heterocystous: <i>Anabaena</i> , <i>Nostoc</i> , dll. Non-heterocystous: <i>Gloecapsa</i> , dll. Bakteri fotosintetik <i>Thiorodaceae</i> <i>Athiorodaceae</i> <i>Chlorobacteriaceae</i>
Heterotrofik	Aerob <i>Azotobacter</i> <i>Beijerinckia</i> <i>Derxia</i> <i>Spirillum lipoferum</i> , dll Anaerob fakultatif <i>Enterobacter cloecae</i> <i>Bacillus polymyxa</i> Klebsiella pneumoniae Anaerob <i>Clostridium pasteurianum</i> <i>Desulfovibrio</i> spp. <i>Desulfotomaculum</i> spp. <i>Methanobacillus omelianskii</i> , dll. Bakteri pengoksidasi metan (<i>Methylosinus tricosporum</i>) <i>Thiobacillus ferrooxidans</i>

Sumber: Watanabe (1978)

Ishizawa (1956) *et al.* cit. Kyuma (2004) mempelajari perubahan populasi mikroba pada permukaan air, lapisan tipis permukaan oksidasi (0–0,5 cm), dan lapisan olah selama periode pertumbuhan padi dalam suatu lisimeter. Pada permukaan air jumlah alga hijau meningkat menjadi 10^5 ml⁻¹, tetapi kemudian menurun perlahan-lahan. Sebaliknya, alga biru-hijau meningkat perlahan-lahan dan mencapai jumlah 10^3 ml⁻¹ pada permulaan bulan Agustus (kira-kira sebulan setelah penggenangan), tetapi kemudian menghilang. Mikroba aerob jumlahnya berkisar 10^5 - 10^6 ml⁻¹ dan jumlah ini cenderung lebih konstan. Lapisan tipis permukaan oksidasi tampaknya lebih cocok untuk perbanyakkan alga hijau dan alga biru-hijau. Di sini jumlah alga biru-hijau (10^6 g⁻¹) hampir sama dengan alga hijau pada permulaan periode penggenangan, tetapi menurun lebih cepat dari alga hijau. Mikroba aerob berfluktuasi antara 10^5 dan 10^6 , tetapi jumlahnya pada lapisan oksidasi cenderung lebih rendah dari pada permukaan air; jumlahnya mencapai puncak beberapa hari setelah tanah tergenang, tetapi kemudian digantikan oleh anaerob fakultatif, yang pada gilirannya digantikan oleh anaerob (Takai, 1969).

Flora sawah merupakan produsen primer yang berkembang di lahan sawah, yang meliputi alga, fitoplankton, dan hidrofita. Alga dapat berupa sianobakteri atau alga biru hijau. Jutono (1973) melaporkan keberadaan alga biru-hijau pada tanah sawah di Indonesia. Sianobakteri merupakan mikroba prokariot berfotosintetis yang memproduksi hanya secara vegetatif. Secara morfologis, sianobakteri dapat digolongkan menjadi: (1) bentuk sel tunggal (*uniseluler*) dan filamen; dan (2) kelompok yang membentuk busa, matras atau makrokoloni. Secara fisiologis, sianobakteri dapat digolongkan menjadi bentuk yang menambat N₂ dan yang tidak (Roger, 1996). Fitoplankton meliputi bentuk sel tunggal dan mikroskopis, dan bentuk koloni. Fitoplankton ini penting sebagai makanan ikan. Hidrofita digolongkan menjadi hidrofita yang tenggelam, terapung, dan timbul. Hidrofita tenggelam seperti *Najas* spp., dan *Ceratophyllum demersum* melindungi

dan menyediakan tempat pembiakan dan pemeliharaan ikan misalnya gurami selama masa pembiakan (Ali, 1999). Hidrofit terapung seperti *Salvinia molesta*, selada air (*Pistia stratiotes*), dan *Hydrilla verticillata* terdapat juga di sawah. Spesies-spesies ini dianggap sebagai gulma lahan sawah. Pertumbuhan yang pesat *Salvinia molesta* misalnya mengakibatkan kehilangan air yang besar melalui evapotranspirasi. Hidrofit timbul (emergent) juga sebagai gulma seperti *Limnocharis flava* dan *Monochorea vaginalis*, *Azolla* spp. dan enceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Kedua spesies yang pertama sebagai gulma juga dapat dimakan. Spesies yang ketiga sebagai gulma juga dapat dimanfaatkan sebagai pupuk hijau dan pakan ternak. Sundaru *et al.* (1976) mencatat adanya 34 spesies tanaman sebagai gulma pada padi sawah. Enam diantaranya termasuk golongan rumput, sembilan golongan teki, dan 19 golongan berdaun lebar.

Fauna sawah meliputi zooplankton, insekta (Hemiptera, Diptera, Coleoptera), ikan, burung, tikus, predator (ular, kodok), dan berang-berang (Ali, 1999).

Spesies zooplankton yang terdapat dalam sawah meliputi Mesocyclops thermocylopiodes, Moina micrura, dan Brachioinus quadridentatus. Plankton ini merupakan makanan bagi larva ikan.

Spesies insekta yang umum terdapat di sawah adalah hemiptera seperti Nepidae, Hydrometridae, Naucoridae, dan Belostomatidae. Insekta lain yang umum juga terdapat di sawah adalah capung dan damselfly (Odonata), diptera, dan coleoptera. Selain sebagai makanan ikan, insekta ini juga ada yang sebagai hama bagi tanaman padi, dan ada pula yang penting untuk mengendalikan hama padi.

Ikan merupakan spesies yang paling penting terdapat di sawah. Spesies yang paling umum terdapat adalah ikan lele (*Clarias macrocephalus* dan *C. batrachus*), *Channa striatus*, *Anabas testudineus*, sepat siam (*Trichogaster pectoralis* dan *T. trichopterus*), ikan mas (*Cyprinus carpio*), tilapia (*Tilapia*

mossambica), tawes (*Puntius javanicus*), aruan (*Ophiocephalus striatus*) *Notopterus notopterus*, *Fluta alba*, *Catla catla*, dan *Betta pugnax*. Ikan ini tidak hanya penting sebagai sumber makanan bagi petani, tetapi juga penting dalam mengendalikan hama padi dalam rangka pengendalian hama terpadu (PHT).

Hewan lain yang terdapat pada ekosistem sawah adalah burung migrasi dan burung pribumi (resident bird) misalnya *Egretta alba*, *Nycticorax nycticorax*, *Orioles chinensis*, *Amaurornis phoenisurus* (Ali, 1999). Banyak burung migrasi menggunakan sawah sebagai tempat berhenti atau singgah. Tersedianya makanan dengan mudah dan habitat sawah yang kondusif merupakan hal yang penting bagi burung-burung ini. Hewan kecil yang umum terdapat di sawah adalah tikus yang merupakan salah satu hama padi.

Proses mikrobiologis pada tanah sawah

Berbagai proses mikrobiologis terjadi di sawah, seperti fiksasi nitrogen, perombakan bahan organik, metanotrofi, denitrifikasi, dan nitrifikasi.

Mikroba perombak memainkan peranan yang penting pada perombakan bahan organik seperti alga dan tanaman air yang sudah mati. Laju perombakan bahan organik ini tergantung pada kondisi lingkungan, spesies, dan kondisi fisiologis tanaman tersebut. Mikroba merombak bahan organik untuk mendapatkan energi. Mikroba ini memerlukan energi oksigen atau zat-zat teroksidasi lain seperti nitrat (NO_3^-), mangan (Mn^{+3} atau Mn^{+4}), besi (Fe^{+3}), sulfat (SO_4^{2-}) atau CO_2 untuk berfungsi sebagai akseptor elektron.

Sekelompok mikroba metanogen, misalnya *Metanosarcina* berperanan dalam degradasi senyawa organik kompleks. Metanogen ini merupakan penghasil metan yang telah menjadi isu global beberapa tahun terakhir ini, karena gas ini dianggap sebagai salah satu penyebab pemanasan bumi. Metan diakui sebagai salah satu gas kamar kaca yang paling penting setelah CO_2 . Lahan sawah merupakan satu sumber metan atmosfer yang signifikan (Sass and Cicerone,

1999). Selain itu terdapat sekelompok mikroba lain yang berperanan sebagai metanotrof, yang dapat mengoksidasi metan, misalnya: *Methylomonas*, *Methylobacter*, *Methylococcus*. Metanotrof merupakan kelompok bakteri metilotrof yang menggunakan metan sebagai sumber karbon dan energi mereka.

Ada kelompok bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*) berperanan pada proses nitrifikasi-denitrifikasi, yang bertanggung jawab terhadap hilangnya N dari lahan sawah. Nitrifikasi merupakan proses penting pada transformasi aerobik NH_4^+ menjadi NO_3^- dengan bantuan bakteri kemoautotrofik pada tanah kering maupun tanah sawah, sedangkan denitrifikasi merupakan reduksi biokimia nitrat atau nitrit menjadi nitrogen gas, baik sebagai nitrogen molekul (N_2) atau nitrogen oksida (N_2O). Yoshida (1978) memberikan contoh-contoh bakteri kemoautotrofik dengan reaksi biokimia seperti pada Tabel 12.

Tabel 12. Bakteri kemoautotrofik dengan reaksi biokimia

Bakteri	Reaksi biokimia
<i>Nitrosomonas</i> sp.	$2 \text{NH}_4^+ + 3 \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{NO}_2^- + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{H}^+$
<i>Nitrobacter</i> sp.	$2 \text{NO}_2^- + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{NO}_3^-$
Pengoksidasi mangan	$\text{Mn}^{2+} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{MnO}_2$
Bakteri besi	$4 \text{Fe}^{2+} + 4 \text{H}^+ + \text{O}_2 \longrightarrow 4 \text{Fe}^{3+} + 2 \text{H}_2\text{O}$
<i>Thiobacillus</i> sp.	$2 \text{S} + 3 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{SO}_4$
<i>Beggiatoa</i> sp.	$2 \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{S} + 2 \text{H}_2\text{O}$
Pengoksidasi metan	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
<i>Hydrogenomonas</i> sp.	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Sumber: Yoshida (1978)

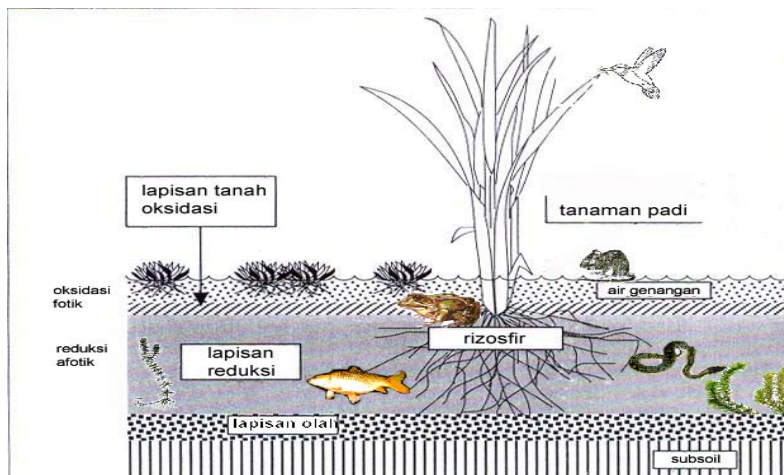
Bila mikroba aerob setelah penggenangan sudah menghabiskan oksigen tanah, bakteri anaerobik menjadi dominan. Respirasi aerobik merupakan reaksi oksidasi-reduksi yang menghasilkan energi secara biologis, dimana senyawa anorganik selain oksigen digunakan sebagai penerima elektron eksternal. Bakteri anaerobik fakultatif ini mereduksi nitrat, oksida mangan, oksida besi, sulfat,

karbonat, atau unsur-unsur oksida lain menjadi molekul nitrogen, senyawa mangan dan besi, sulfida, metan, atau produk-produk reduksi lain (Yoshida, 1978) seperti diperlihatkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Berbagai proses reduksi oleh mikroba anaerobik fakultatif pada tanah sawah

Bakteri	Proses reduksi
Heterotrofik	$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2 CO_2 + 2 C_2H_5OH$
Denitrifikasi	$C_6H_{12}O_6 + 4 NO_3^- \longrightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 2 N_2$
Denitrifikasi	$5 CH_3COOH + 8 NO_3^- \longrightarrow 10 CO_2 + 6 H_2O + 8 OH^- + 4 N_2$
Pereduksi nitrat	$CH_3COOH + NO_3^- \longrightarrow 2 CO_2 + OH^- + NH_3$
Pereduksi mangan	$CH_3COOH + MnO_2 \longrightarrow 2 CO_2 + Mn^{2+} + 4 H^+$
Pereduksi besi	$CH_3COOH + 8 Fe^{3+} + 2 H^+ \longrightarrow 2 CO_2 + 8 Fe^{2+} + 8 H^+$
<i>Desulfovibrio</i> sp.	$4 H_2 + SO_4^{2-} \longrightarrow S^{2-} + 4 H_2O$
Pereduksi sulfat	$2 CH_3CHOHCOOH + SO_4^{2-} \longrightarrow 2 CH_3COOH + 2 H_2O + 2 CO_2 + S^{2-}$
<i>Methanomonas</i> sp.	$CO_2 + 4 H_2O \longrightarrow CH_4 + 2 H_2O$

Sumber: Yoshida (1978)



Gambar 18. Ekosistem lahan sawah

DAFTAR PUSTAKA

- Afany, M. R. dan Partoyo. 2001. Pencirian abu vulkanik segar Gunung Merapi Yogyakarta. *Jurnal Tanah dan Air* 2: 88 – 96.
- Ali, A.B. 1999. Awareness through uses: paddy-cum-fish in Malaysia. <http://www.museum-japan.com/rcj/auyaudin.html>
- Allen, B. L. and D. S. Fanning. 1983. Composition and soil genesis. p. 141–192. *In* L. P. Wilding *et al.* (Eds.). *Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concept and interactions*. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam.
- Allen, B. L. and B. F. Hajek. 1989. Mineral occurrence in soil environment. p. 199-278. *In* J. B. Dixon and S. B. Weed (Eds.). *Minerals in Soil Environments*. Soil Sci. Of Amer., Madison, Wisconsin, USA.
- Araki, S., H. Hirai, and K. Kyuma. 1986. Phosphate absorption of red and/or yellow colored soil materials in relation to the characteristics of free oxides. *Soil Sci. Plant. Nutr.* 32: 609-616.
- Barber, D.A., M. Ebert, and N.T.S. Evans. 1962. The movement of ¹⁵O through barley and rice plants. *J. Exp. Bot.* 13: 397 – 403.
- Barnhisel, R. I. 1977. Chlorit and hidroxy interlayering vermikulit and smectite. p. 331-356. *In* Dixon *et al.* (Eds.). *Mineral in Soil environments*. Soil Sci.

Soc. Am. Madison, Wisconsin.

- Bigham, J. M., D. C. Golden, S. W. Buol, S. B. Weed, and L. H. Bowen. 1978. Iron oxides mineralogy of well drained Ultisols and Oxisol: II. Influence on color, surface area and phosphate retention. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42: 825-830.
- Borchardt, G. A. 1989. Montmorillonite and other Smectite minerals. p. 293-330. *In* J. B. Dixon and S. B. Weed (*Eds.*). *Minerals in Soil Environments*. Soil Sci. Of Amer., Madison, Wisconsin, USA.
- Borchardt, G.A. 1977. Montmorillonite and other smectite minuals. p. 293-330. *In* J.B. Dixon and S.B. Weed (*Eds.*) *Minerals in Soil Environmental*. Soil Sci. Soc. Of Amer., Madison Wisconsin, USA.
- Brindley, G.W., C.C.Kao, J.L. Horison, M. Lipsicas, and R. Raythanthan. 1986. Relation between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. *Clay and Clay Min.* 34: 239-240.
- Brinkman, R. 1970. Ferolysis, a hidromorphic soil farming process. *Geoderma* 3 : 199-206. Else vier Publ. Co., Amsterdam.
- Buol, S. W., F. D. Hale, and R. J. McCracken. 1980. *Soil Genesis and Classification*. 2nd edition. The Iowa State. Univ. Press. America.
- Calvert, C. S., S. W. Buol, and S. B. Weed. 1980. Mineralogical characteristics and transformation of a vertical rock saprolit-soil sequence in the North Carolina Piedmont. II. Feldspars alteration products-Their transformation through the profile. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 : 1.104 – 1.112.
- Camp, C.R. and W. R. Gill. 1969. The effect of drying on soil strength parameters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 641-644.
- Chaudhary, T.N., and B.P. Ghildyal. 1969. Aggregate stability of puddle soil during rice growth. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 17: 261-265.

- De Coninck, F. 1974. Physico-chemical aspects of pedogenesis. State Univ. of Ghent
- Diamond. 1985. Availability and, management of phosphorus in wetland soils in relation to soil characteristic. p. 269-283. *In* Wetland Soil: Characterization, Classification and Utilization. IRRI, Los Banos, Philippines.
- Driessen, P.M. and R. Dudal. 1989. Lecture Notes on the geography, formation, properties and use of the major soils of the world. p. 93-103. *In*. Agricultural University Wageningen, Katholieke Universiteit Leuven. Wageningen and Leuven.
- Duchaufour, D. 1982. Pedology (Eng. Ed.). George Allen & Unwin, London.
- Eswaran, H. 1985. Interpreting Physical Aspects of Wetland Soil Management from Soil Taxonomy. p. 17-30. *In* IRRI (1985). Soil Physics and Rice. International Rice Research Institute. Los Banos. Laguna. Philippines.
- Eswaran, H., G. Stoop, and P. De Paepe. 1973. A contribution to the study of soil formation on Isla Santa Cruz, Galapagos. *Pedologie* 23:100 – 121.
- Fanning, D. S., and M. C. B. Fanning. 1989. Soil: Morphology, genesis and classification. John Wiley & Son. New York.
- Flach, K. W., W. D. Nettleton, L. H. Gile, and J. G. Cady. 1969. Pedocementation induration by silica, carbonates, and sesquioxides in Quarternary. *Soil Sci.* 107: 442 – 453.
- Gac, J. V. 1968. Les alterations de quelques roches cristallines des vosges. *In* Duchaufour, D. 1982. Pedology (Eng. Ed.). George Allen & Unwin, London.
- Gerard, C.J. 1965. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions, and exchangeable cations on soil strength. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:

641-645.

- Ghildyal, B.P. 1978. Effects of compaction and puddling on soil physical properties and rice growth. p. 315-336. *In* IRRI (1978). Soil and Rice. International Rice Research Institute. Los Banos. Philippines.
- Gilkes, R. J., G. Scholz, and G. M. Dimmock. 1973. Lateritic depth weathering of granite. *J. Soil Sci.* 24: 523 – 536.
- Gill, W.R. 1959. The effects of drying on the mechanical strength of Lloyd clay. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 255-257.
- Glassmann, J. R. and G. H. Simonson. 1985. Alteration of basalt of Western Oregon's. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 262-273.
- Glassmann, J. R. 1982. Alteration of andesit in wet, unstable soil of Oregon's Western Cascades. *Clays and Clay Min.* 30: 253-263.
- Hardjoesastro, R. 1982. Gunung Galunggung. Ceramah Lembaga Pengabdian Masyarakat IPB, Bogor, 28 Mei 1982.
- Hardjowigeno, S. dan M. L. Rayes. 2001. Tanah Sawah. Program Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor. 155 hlm.
- Heleen, B., J. Six. and P.F. Hendrix. 2002. Aggregate-protected carbon in no-tillage and conventional tillage agroecosystems using carbon-14 labeled plant residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1.965-1.973.
- Huang, P. M. 1966. Mechanism of neutral fluoride interaction with soil clay minerals and silica solubility scale for silicates common in soils. Ph D. Thesis, University Wisconsin, Madison.
- Huang, P. M. 1989. Felspars, olivine, Pyroxenes, and amphiboles. p. 945-1.050. *In* J. B. Dixon and S. B. Weed (*Eds.*). Minerals in Soil Environments. Soil Sci. Of Amer., Madison, Wisconsin, USA.
- Ismail, F. T. 1970. Biotite weathering and clay formation in arid and humid region

- California. Soil Sci. 109: 257-261.
- Jackson, M.C. 1968. Weathering of primary and secondary minerals in soil. Trans. Int. Congr. Soil Sci., 9th (Adelaide, Aust.) 4: 281-292.
- Jutono. 1973. Blue green algae in rice soils of Jogjakarta, Central Java. Soil. Biol. Biochem. 5: 91 – 96.
- Keersbilck, N.C. and S. Soeprapto. 1985. Physical measurements in lowland soil techniques and standardization. p. 99-111. *In* IRRI (1985). Soil Physics and Rice. International Rice Research Institute. Los Banos. Philippines.
- Kyuma, K. 2004. Paddy Soil Science. Kyoto University Press, Japan and Trans Pacific Press, Australia.
- Lal, R. 1981. Soil management in the humid tropics of west Africa. In. "Characterization of Soils" by D.J. Greenland (Ed.) Clarendon Press. Oxford. 188-201.
- Lim, R.P. 1980. Population changes of some aquatic invertebrates in rice fields. *In* Tropical Ecology and Development, Proc.5th International Symposium of Tropical Ecology. International Society of Tropical Ecology, Kuala Lumpur.
- Mohr, E. G. J., F. A. Van Baren, and J. Van Schuylenborgh. 1972. Tropical Soil. Third Edition. The Hague Paris-Jakarta.
- Munir, M. 1987. Pengaruh Penyawahan terhadap Morfologi, Pedogenesis, Elektrokimia dan Klasifikasi Tanah. Desertasi. Program Pasca Sarjana-IPB, Bogor.
- Nearing, M.A., West, L.T., and Bradford, J.M. 1988. Consolidation of an unsaturated illitic clay soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 929-934.
- Nettleton, W. D., K. W. Flach, and R. E. Nelson. 1970. Pedogenic weathering of tonalite in Southern California, Geoderma 4: 387-402.
- Patrick, W.H. and C.N. Reddy. 1978. Chemical changes in rice soil. p. 361-379. *In*

Soils and Rice. IRRI, Los Banos, Philippines.

Ponnamperuma, F.N. 1965. Dynamic aspects of flooded soil and the nutrition of rice plant. pp. 295-328. *In* The Mineral Nutrition of Rice Plant. IRRI, Symp. John Hopkin Press.

Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils *Adv. Agron.* 24: 29-96.

Ponnamperuma, F.N. 1985. Chemical kinetics of wetland rice soil relative to soil fertility. *In* Wetland Soils, Characterization, Classification and Utilization. The International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Prasetyo, B. H. 1995. Mineral pada tanah sulfat masam di Pulau Petak, Kalimantan Selatan. hlm. 85-91 *dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat No.2. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Prasetyo, B. H. and R. J. Gilkes. 1997. Properties of kaolinite from oxisol and Alfisols in West Java. *AGRIVITA* 20 (4): 220-227.

Prasetyo, B. H. dan A. Kasno. 1998. Sifat morfologi, komposisi mineral dan fisika-kimia tanah sawah irigasi di Propinsi Lampung. *Jurnal Tanah Tropika* VI (12): 155-168.

Prasetyo, B. H., M. Soekardi, dan H. Subagyo. 1996. Tanah-tanah sawah intensifikasi di Jawa: Susunan mineral, sifat-sifat kimia, dan klasifikasinya. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 14: 12-24.

Prasetyo, B. H., S. Suping, Subagyo H., Mujiono, and H. Suhardjo. 2001. Characteristics of rice soil from the tidal flat areas of Musi Banyuasin, South Sumatra. *Indonesian Journal of Agricultural Science* 2 (1): 10-26.

Prasetyo, B. H., Sulaeman, and N. Sri Mulyani. 1997. Red Yellow soils from Kotabumi, Lampung: Their characteristics, classification, and utilization. *Indonesian*

Journal of Crops Science 12 (1 & 2): 37-45.

- Prasetyo, B. H., Sulaeman, dan H. Subagyo. 1995. Tanah sawah bukaan baru di daerah Kotabumi, Lampung: Karakterisasi dan prospek penggunaan pupuk P-alam. hlm. 131-146 *dalam* Santoso, D. (Eds.) Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Penelitian Tanah dan Agroklimat: Buku II Bidang Potensi Sumber Daya Lahan. Cisarua, Bogor, 26-28 September 1995. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Prasetyo, B.H. dan A. Kasno. 2001. Sifat morfologi, komposisi mineral, dan fisika-kimia tanah sawah irigasi di Propinsi Lampung. Jurusan Ilmu Tanah UNILA dan HITI Kamda Lampung Jurusan Tanah Tropika 12: 155-167.
- Prasetyo, B.H., Sawiyo, dan Nata Suharta. 1998. Pengaruh bahan induk terhadap sifat kimia tanah dan komposisi mineraloginya: Studi kasus di Daerah Pamatikarata, Liwa, Sumba Timur. hlm. 17-30 *dalam* Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat: Bidang Pedologi. Bogor, 10-12 Februari 1998. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Prihar, S.S., B.P. Ghildyal, D.K. Painuli, and H.S. Sur. 1985. Physical properties of mineral soils affecting rice-based cropping systems. p. 57-70. *In* IRRI (1985). Soil Physics and Rice. International Rice Research Institute. Los Banos, Philippines.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1996. Pemetaan Tanah Tingkat Semi Detil Daerah Pamatikarata, Lewa, Kab. Sumba Timur, Propinsi NTT. Buku III. Deskripsi Seri Tanah. 80 hlm.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1996. Survei dan Pemetaan Tanah Tingkat Semi Detil DAS Citarum Bawah, Propinsi Jawa Barat. Buku III. Uraian Seri Tanah. 171 hlm.
- Puslittanak (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat). 1996. Penelitian Mineral dan

- Sifat Kimia Tanah dalam Kaitannya dengan Kapasitas Erapan P pada Tanah Sawah Bukan Baru. Laporan Kegiatan I. 21 hlm.
- Puslittanak (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat). 1997. Penelitian Mineral dan Sifat Kimia Tanah dalam Kaitannya dengan Kapasitas Erapan P pada Tanah Sawah Bukan Baru. Laporan Kegiatan II. 21 hlm.
- Rayes, M. L. 2000. Karakteristik, genesis, dan Klasifikasi Tanah Sawah Berasal dari Bahan Vulkanik Merapi. Desertasi Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- Rayes, M. L., B. Mulyanto, dan S. Hardjowigeno. 2003. Pembentukan duripan pada bahan vulkan kasar merapi. *Jurnal Tanah Tropika* VIII (16): 77-86.
- Reddy. 1999. Parameter yang dapat dipakai untuk mengukur dengan baik derajat anaerobiosis tanah dan tingkat transformasi biogeokimia yang terjadi adalah potensial redoks (nilai EH dikoreksi pada pH 7) (Reddy *et al.*, 1999)
- Ribbe, P. H. 1975. Felspar mineralogy. *Rev. Mineral.* Vol 2. Min. Soc. Am. Washington, DC.
- Rice, T. J. Jr., S. W. Buol, and S. B. Weed. 1985. Soil saprolite profiles derived from mafic rock in the North California Piedmon I. Chemical, Morphological and Mineralogical characteristics and Transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 171-178.
- Roger, P.A. 1996. *Biology and Management of the Floodwater Ecosystem in Ricefields.* International Rice Research Institute, Manila.
- Roger, P.A., G. Germani, and P.A. Reynaud. 1981. Empirical study of the validity of the logarithmic transformation for the statistical treatment of enumerations of soil organisms [in French]. *Cah. ORSTROM, Ser. Biol.* 43: 75-81.
- Sanches, P. A. 1976. *Properties and management of soil in the tropic.* John Wiley

and Sons, New York.

Sanchez, A. 1993. Sifat dan Pengelolaan Tanah Tropika. Jilid 2. Institut Teknologi Bandung.

Sass, R.L., and R.J. Cicerone. 1999. Photosynthate allocations in rice plants: food production or atmospheric methane <http://www.pnas.org/cgi/content/99/19/11993>

Schwertmann, U. and R. M. Taylor. 1989. Iron Oxides. pp. 379-427. *In* J. B. Dixon and S. B. Weed (*Eds.*). Minerals in Soil Environments. Soil Sci. Of Amer., Madison, Wisconsin, USA.

Setyawan, D. dan H. Hanum. 2003. Sidik komponen utama untuk mengidentifikasi keragaman data mineral Tanah sawah asal Tugumulyo, Musi Rawas, Sumatera Selatan. *Jurnal Tanah Tropika*. VIII (16): 103-110.

Setyawan, D., dan Warsito. 1999. Komposisi mineral Tanah-tanah yang telah lama disawahkan di daerah Tugumulyo, Sumatera Selatan. *Jurnal Tanah Tropika* IV (8): 131-138.

Sharma, P.K. and S.K. De Data. 1985. Effects of Puddling on Soil Physical Properties and Processes. p. 217-234. *In* IRRI (1985). Soil Physics and Rice. International Rice Research Institute. Los Banos, Laguna, Philippines.

Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy USDA. Second Edition. Agr. Handbook 436. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington DC.

Subagyono, K., A. Abdurachman, and Nata Suharta. 2001. Effects of Puddling Various Soil Types By Harrows on Physical Properties of New Developed Irrigated Rice Areas in Indonesia. *Proceeding of the Subandiono, R. E.* 2004. Pedological Characteristics of Wetland Soils in North Palembang, Indonesia. MSc thesis. University of The Philippines, Los Banos.

- Subandiono, R.E. 2004. Pedological Characteristics of Soil in Musi Banyuasin. Thesis MSc. Degree. Faculty of the Graduate School. Univ. of the Philippines Los Banos.
- Subardja, D., and P. Buurman. 1980. A toposequence of Latosols on Volcanic rock in the Bogor – Jakarta area. p. 25-45. *In* P. Buurman (*Ed.*). Red Soils in Indonesia.
- Sulaeman, Eviati, dan J. Sri Adiningsih. 1997. Pengaruh Eh dan pH terhadap sifat erapan fosfat, ke larutan besi, dan hara lain pada tanah Hapludox Lampung. hlm. 1-18 *dalam* Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat: Bidang Kimia dan Biologi Tanah. Cisarua, Bogor, 4-6 Maret 1997. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Sundaru, M., Mahyuddin Syam, dan Janari Bakar. 1976. Beberapa jenis gulma pada padi sawah. Buletin Teknik No.1. Lembaga Pusat Penelitian Pertanian, Bogor.
- Sutami dan Djakamihardja, 1990. Kenaikan berikutnya bersamaan dengan reduksi tanah dan ditentukan oleh: (a) pH awal dari tanah; (b) macam dan kandungan komponen tanah teroksidasi terutama besi dan mangan; serta (c) macam dan kandungan bahan organik (Sutami dan Djakamihardja, 1990)
- Sys, C. 1985. Evaluation of the Physical Environment for Rice Cultivation. p. 31-44. *In* IRRI (1985). Soil Physics and Rice. International Rice Research Institute. Los banos, Laguna, Philippines.
- Taberima, S. 1999. Pengaruh Penyawahan Terhadap Karakteristik Beberapa Jenis Tanah. Disertasi. Program Pasca Sarjana-IPB, Bogor.
- Takai, Y. 1969. The mechanism of reduction in paddy soils. Japan Agric. Res. Quarterly (JARQ) 4(4): 20 – 23.

-
- Tardy, Y., G. Bocqueier, H. Paquet, and G. Millot. 1973. Formation of clay from granite and its distribution in relation to climate and topography. *Geoderma* 10: 271-284.
- Towner, G.D. 1961. Influence of soil water suction on some mechanical properties of soil. *J. Soil. Sci.* 12: 180-187.
- Van Breemen, N. 1972. Soil forming processes in acid sulphate soils. *Acid Sulphate Soils*. ILLRI publication 18, Vol. 1. Wageningen, The Netherland.
- Van Breemen, N., P. Buurman, and R. Brinkman. 1992. *Processes in Soils*. Text for Course J050-202. Dept. Soil Sci. and Geology. Agricultural University Wageningen.
- Van Raalte, M.H. 1941 On the oxygen supply of rice roots. *Ann. Bot. Gardens, Buitenzorg* 51: 43 – 58.
- Van Wambeke, A. 1992. *Soil of the Tropics. Properties and Appraisal*. McGraw-Hill. Inc. New York
- Ventura, W., and I. Watanabe. 1984. Dynamics of nitrogen availability in lowland rice soils: the role of soil below plow layer and effect of moisture regimes. *Philipp. J.Crop. Sci.* 9: 135 – 142.
- Walker, A. 1983. The effects of magnetite on oxalate and dithionite extratable iron. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1.022-1.026.
- Watanabe, I. 1978. Biological nitrogen fixation in rice soils. pp. 465 – 478. *In* International Rice Research Institute, *Soils and Rice*. Los Baños, Philippines.
- Watanabe, I. and C. Furasaka. 1980. Microbial ecology of flooded rice soils, pp. 125-168. *In* M. Alexander (*Ed.*), *Advances in Microbial Ecology*, 4. Plenum Publishing Corporation.

- Watanabe, I. and P.A. Roger. 1985. Ecology of flooded ricefields. pp. 229-243. *In* Wetland Soils: Characterization, Classification, and Utilization. International Rice Research Institute, Manila.
- Willet, I.R. 1985. The Reduction dissolution of phosphate ferrihydrite and strengite. *Aust. J. Soil Res.* 23: 237-244.
- Williams, J. and C.F. Shaykewich. 1970. The influence of soil water matric potential on the strength properties of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 34: 835-840.
- Wilson, M. J. and P. W. Cradwick. 1972. Occurrence and interstratified kaolinite-monomorillonite in some Scottish soils. *Clay Miner.* 9: 435-437.
- Winoto, J. 1985. Genesis, Klasifikasi dan Sifat-sifat Tanah Sawah Jenis Latosol pada Beberapa Tingkat Kedalaman Air Tanah. *Faperta IPB, Jurusan Tanah.*
- Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop sciebce. The International Rice Research Institute, Manila, Philippines.
- Yoshida, T. 1978. Microbial metabolism in rice soils, pp. 445 – 463. *In* International Rice Research Institute, Soils and Rice. Los Baños, Philippines.
- Yusuf, Adi S. Djakamihardja, G. Satari dan S. Djakasuttami. 1990. Pengaruh pH dan Eh terhadap kelarutan Fe, Al, dan Mn pada lahan sawah bukaan baru jenis tanahOxisols, Sitiung. hlm. 237-264 *dalam* Prosiding Pengelolaan Sawah Bukaan Baru Menunjang Swasembada Pangan dan Program Transmigrasi: Prospek dan Masalah. Padang, 17-18 September 1990. Fakultas Pertanian Universitas Ekasakti. Balai Penelitian Tanaman Pangan Skarai, Padang.

3. STATUS HARA TANAH SAWAH UNTUK REKOMENDASI PEMUPUKAN

Agus Sofyan, Nurjaya, dan Antonius Kasno

Pupuk merupakan salah satu sarana yang sangat penting untuk meningkatkan produksi pertanian. Penggunaannya meningkat pesat setelah pencanangan program intensifikasi yang dimulai tahun 1969. Rekomendasi pemupukan padi sawah yang berlaku sekarang bersifat umum untuk semua wilayah Indonesia tanpa mempertimbangkan status hara tanah dan kemampuan tanaman menyerap hara. Sementara diketahui bahwa status hara P dan K lahan sawah sangat bervariasi dari rendah sampai tinggi (Adiningsih *et al.*, 1989, Moersidi *et al.*, 1990).

Pemupukan P dan K secara terus-menerus pada tiga dasa warsa terakhir ini menyebabkan sebagian besar lahan sawah di Jawa, Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Lombok dan Bali berstatus hara P dan K tinggi. Selain itu penggunaan pupuk P dan K terus-menerus menyebabkan ketidakseimbangan hara tanah. Ketidak seimbangan hara disinyalir mengakibatkan terjadinya pelandaian produktivitas (*leveling off*) padi sawah. Kadar hara P dan K yang tinggi menyebabkan ketersediaan hara mikro seperti Zn dan Cu tertekan. Selain itu dilaporkan oleh Kasno *et al.* (2003) bahwa sebagian besar lahan sawah di Indonesia berstatus C-organik <2%.

Hasil penelitian pada lahan sawah intensifikasi baik di Jawa maupun di luar Jawa menunjukkan bahwa sebagian besar tanaman padi sudah tidak tanggap terhadap pemupukan P dan K. Untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan menjaga hasil padi sawah tetap tinggi maka rekomendasi pemupukan padi pada lahan sawah intensifikasi perlu disusun berdasarkan status hara tanah. Hal ini dapat dilakukan apabila tersedia peta status hara tanah skala operasional (1:50.000) pada lahan sawah intensifikasi. Status hara tanah dapat ditentukan dengan serangkaian penelitian uji tanah.

Status hara tanah dapat dibuat bila telah disusun kriteria klasifikasi status hara berdasarkan hasil-hasil penelitian uji tanah, mulai dari penjajagan hara, studi korelasi,

kalibrasi sampai penyusunan rekomendasi. Hasil penelitian uji tanah yang telah dilaksanakan Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat (Puslitbangtanak) menunjukkan bahwa penggunaan ekstrak HCl 25% untuk penetapan P dan K potensial mempunyai korelasi yang baik dengan hasil tanaman padi sawah (Nursyamsi, 1994). Berdasarkan penelitian-penelitian kalibrasi di berbagai tempat diperoleh bahwa klasifikasi P untuk padi sawah dengan pengekstrak HCl 25% adalah sebagai berikut: rendah: $<20 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ } 100 \text{ g}^{-1}$, sedang: $20\text{-}40 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ } 100 \text{ g}^{-1}$, dan tinggi: $>40 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ } 100 \text{ g}^{-1}$ tanah (Moersidi, *et al.*, 1990). Sedangkan klasifikasi hara K dengan pengekstrak yang sama untuk padi sawah yaitu rendah: $<10 \text{ mg K}_2\text{O} \text{ } 100 \text{ g}^{-1}$, sedang: $10\text{-}20 \text{ mg K}_2\text{O} \text{ } 100 \text{ g}^{-1}$, dan tinggi: $>20 \text{ mg K}_2\text{O} \text{ } 100 \text{ g}^{-1}$ tanah (Adiningsih *et al.*, 1989).

Untuk mendapatkan informasi mengenai sebaran dan luas status hara lahan sawah, Puslitbangtanak telah memetakan status hara P dan K di 18 provinsi dengan skala 1:250.000, selain peta status hara skala 1:50.000 di beberapa kabupaten pantai utara (pantura) Jawa. Bab ini menelaah hasil-hasil penelitian uji tanah untuk tanaman padi dan status hara tanah sawah per pulau di Indonesia.

UJI TANAH

Peta status hara tanah menunjukkan status kadar hara dalam kondisi kurang, cukup dan berlebih dengan kriteria tertentu. Batas kecukupan hara tanah dapat ditentukan dengan serangkaian penelitian uji tanah baik di laboratorium, rumah kaca maupun di lapangan. Uji tanah merupakan cara yang relatif cepat, murah dan tepat dalam menduga kebutuhan pupuk untuk jenis tanaman tertentu. Oleh karena itu uji tanah dapat digunakan untuk menyusun rekomendasi pemupukan spesifik lokasi yang efisien dan rasional serta menghindari kerusakan tanah dan pencemaran lingkungan.

Adapun tahapan penelitian uji tanah antara lain: (1) pengambilan contoh/survei kesuburan tanah; (2) penelitian penjajagan hara di laboratorium dan rumah kaca; (3) penelitian uji korelasi di laboratorium dan rumah kaca; (4) penelitian kalibrasi uji tanah dan tanggap tanaman di lapangan; dan (5)

penyusunan rekomendasi pemupukan spesifik lokasi (Widjaja-Adhi *et al.*, 2000, Adiningsih *et al.*, 2000). Uji tanah harus diteliti dalam satu sistem iklim – tanah – tanaman tertentu.

Pengambilan contoh tanah

Contoh tanah atau survei kesuburan tanah diambil untuk mendapatkan contoh tanah yang mewakili bagi keperluan penelitian penjajagan hara dan studi korelasi di rumah kaca. Contoh tanah yang mewakili adalah contoh tanah yang mempunyai kandungan hara bervariasi dari sangat rendah sampai sangat tinggi pada suatu jenis tanah tertentu. Selain itu data kesuburan/kandungan hara tanah-tanah tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan lokasi penelitian kalibrasi di lapangan.

Penelitian penjajagan hara

Penelitian penjajagan hara dimaksudkan untuk mempelajari hara yang menjadi faktor pembatas pertumbuhan tanaman pada tanah tertentu. Hasil penelitian penjajagan hara digunakan sebagai dasar untuk menentukan pupuk dasar yang harus diberikan pada penelitian korelasi di rumah kaca dan penelitian kalibrasi di lapangan, agar hara lain selain yang diuji dalam kondisi yang cukup optimum bagi pertumbuhan tanaman.

Penjajagan hara diteliti di rumah kaca dengan metode *plus one test* atau *minus one test*. Metode *plus one test* merupakan metode dengan penambahan jenis hara satu per satu sehingga pada perlakuan akhir mendapat semua hara yang dibutuhkan oleh tanaman. Sebaliknya *minus one test* merupakan metode di mana perlakuan pertama mendapat semua hara yang dibutuhkan oleh tanaman (perlakuan lengkap), kemudian perlakuan selanjutnya merupakan perlakuan lengkap yang dikurangi satu unsur hara tertentu dan seterusnya. Takaran hara yang diberikan ditentukan berdasarkan beberapa hasil studi pustaka atau hasil penelitian sebelumnya.

Tanaman padi ditanam seperti pada kondisi disawahkan dengan digenangi, tanaman dipelihara, kemudian dipanen berat biomassa keringnya. Berdasarkan perbandingan berat kering tanaman antara perlakuan-perlakuan tersebut dapat diketahui unsur hara yang menjadi faktor pembatas pertumbuhan tanaman padi.

Penelitian uji korelasi

Tingkat kesuburan tanah diduga dengan cara analisis di laboratorium dengan berbagai metode analisis tanah. Sifat pengekstrak yang digunakan untuk analisis tanah bervariasi, dan masing-masing cocok untuk tanah dan tanaman tertentu. Oleh karena itu untuk menentukan pengekstrak terbaik untuk analisis hara pada tanah dan tanaman tertentu perlu dipelajari dengan penelitian korelasi.

Penelitian korelasi merupakan metode penelitian untuk mencari pengekstrak terbaik untuk tanah dan tanaman tertentu. Contoh tanah yang digunakan untuk percobaan dianalisis kadar haranya yang akan diuji dengan beberapa pengekstrak. Kemudian dicoba/diteliti tanggap tanaman terhadap pemupukan dengan beberapa tingkat hara yang diuji di rumah kaca. Pengekstrak terbaik ditentukan dengan persamaan regresi antara nilai uji tanah dari beberapa pengekstrak dengan persen hasil atau serapan hara yang berasal dari percobaan rumah kaca tersebut. Persen hasil dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Persen hasil} = \frac{Y_0}{Y_{\max}} \times 100 \%$$

Dimana : Y_0 = hasil tanaman padi tanpa pupuk yang diuji
 Y_{\max} = hasil maksimum dengan pupuk yang diuji

Pengekstrak terbaik ditentukan oleh persamaan regresi yang mempunyai nilai koefisien korelasi r (linier) tertinggi dan nyata.

Dalam penelitian korelasi semua hara selain hara yang diuji harus diberikan dalam jumlah yang cukup. Tanaman indikator dan tanah harus sama dengan percobaan penjajagan hara dan kalibrasi di lapangan. Tanaman dipanen saat berumur 6 – 8 minggu setelah tanam (MST), dengan demikian hasil tanaman

yang dimaksud adalah berat biomassa kering.

Penentuan pengestrak terbaik mengacu pada beberapa kriteria, yaitu: (1) sederhana dan mudah pengerjaannya serta tidak menggunakan alat yang rumit dan mahal; (2) menggunakan bahan kimia yang tidak berbahaya dan murah; (3) waktu yang dibutuhkan untuk mengerjakan singkat; dan (4) jika diulang memberikan akurasi ketelitian dan kestabilan pengukuran tinggi (Melsted and Peck, 1973). Di lain pihak Skogley (1994) menyatakan bahwa selain kriteria tersebut pengestrak terbaik harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut: (1) pengestrak harus bersifat universal (dapat mengestrak unsur sekaligus); (2) berlaku untuk semua jenis tanah; dan (3) dapat mengontrol sensitivitas ketersediaan hara untuk tanaman.

Metode ekstraksi dengan kriteria tersebut perlu diuji pada kondisi tanah dengan sifat-sifat atau ciri-ciri yang relatif seragam. Namun keragaman tanah di Indonesia cukup banyak dan jenis tanaman yang dibudidayakan sangat bervariasi. Selain itu serapan hara tanah oleh tanaman tidak sama pada semua tanah, sebagai contoh serapan P oleh tanaman jagung pada tanah masam dipengaruhi oleh Fe_2O_3 bebas (Al-Jabri *et al.*, 1987). Oleh karena itu perlu pengelompokan jenis tanah dan tanaman untuk mendapatkan metode ekstraksi terbaik. Pengestrak terbaik untuk padi sawah pada berbagai tanah sangat bervariasi (Tabel 1). Berdasarkan hasil-hasil uji tanah yang diteliti di Puslitbangtanak umumnya HCl 25% merupakan pengestrak terbaik untuk analisis hara P dan K pada padi sawah tanah Inceptisol baik di Jawa maupun di luar Jawa.

Tabel 1. Jenis pengestrak terbaik untuk analisis P dan K pada berbagai jenis tanah untuk padi sawah

Hara	Tanah	Pengestrak terbaik	Sumber
P	Vertisol, Ngawi	Olsen	Widjaja-Adhi, 1986
	Inceptisol, Jawa	HCl 25 %	Puslittanak, 1992
	Inceptisol, Sulawesi Selatan	HCl 25%, Olsen	Nursyamsi <i>et al.</i> , 1994
	Ultisol, Lampung	Olsen	Setyorini <i>et al.</i> , 2000
	Inceptisol, Sumatera Utara	Bray 1, Olsen	Rochayati <i>et al.</i> , 1999
	Entisol, Lampung	Bray 1, Olsen	Rochayati <i>et al.</i> , 1999
K	Inceptisol, Jawa	HCl 25 %, NH_4OAc 1N pH 7	Puslittanak, 1992
	Inceptisol, Sulawesi Selatan	NH_4OAc 1N pH 7, Olsen	Puslittanak, 1992
	Inceptisol, Sukabumi	HCl 25%, NH_4OAc 1N pH 7	Adiningsih dan Sudjadi, 1983

Korelasi hara Zn dan Cu telah diteliti dengan menggunakan contoh tanah dari Jawa Barat (Jabar) dan Jawa Timur (Jatim) (Al-Jabri *et al.*, 1987). Penelitian menggunakan empat pengekstrak, yaitu 0,1 N HCl (1:10, selama 45 menit); campuran 0,005 M DTPA (Diethyllene Triamine Pentaacetic Acid)-0,1 M TEA (Triethanol-amine)-0,01 M CaCl_2 pada pH 7,3 (1:2, selama 2 jam); 0,01 M EDTA (Ethylene-diamine tetraacid)-1 M $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (1:5, selama 30 menit); dan Diphenylthio-carbazone (Dithizone) (1:20, selama 1 jam). Hasil penelitian menunjukkan pengekstrak terbaik untuk analisis Zn adalah DTPA-TEA.

Korelasi untuk hara S tanah sawah di Jawa telah dipelajari dengan menggunakan 15 contoh tanah (Sulaeman *et al.*, 1984). Empat pengekstrak yang digunakan dalam penelitian antara lain: 0,15% CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ berkadar 500 ppm P, larutan Morgan (NaOAc pH 4,8), dan 0,01 M HCl. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengekstrak terbaik untuk analisis hara S pada tanah sawah untuk tanaman padi adalah metode $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ berkadar 500 ppm P dengan batas kritis 120 ppm SO_4^{2-} . Dari 15 contoh tanah yang digunakan untuk percobaan rumah kaca 8 diantaranya tanggap terhadap pemupukan belerang (persen hasil < 85%).

Kalibrasi uji tanah

Kalibrasi uji tanah merupakan percobaan lapang tentang tanggap tanaman terhadap pemupukan, yang dimaksudkan untuk mengetahui batas kritis pertumbuhan tanaman pada suatu tanah tertentu. Ketersediaan hara dalam tanah diekspresikan dengan tingkat rendah, sedang dan tinggi atau dalam suatu selang hara tertentu. Kalibrasi dicoba pada lokasi dengan status hara tanah bervariasi dari rendah sampai tinggi. Widjaja-Adhi dan Silva (1986) menyatakan bahwa kalibrasi dapat dilaksanakan dengan tiga pendekatan: (1) lokasi banyak, pada tanah yang mempunyai status hara bervariasi dari rendah, sedang, dan tinggi; (2) lokasi bekas percobaan pemupukan; dan (3) lokasi tunggal.

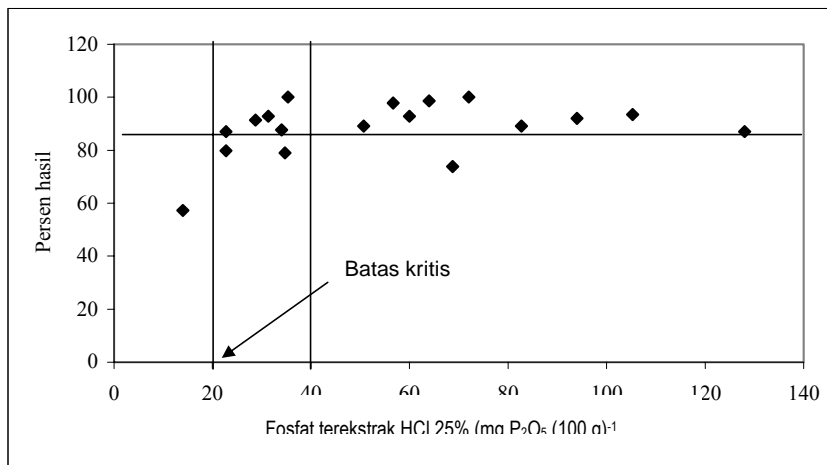
Kalibrasi dengan pendekatan lokasi banyak dilaksanakan 20 – 30 lokasi dengan status hara yang diuji bervariasi dari rendah sampai tinggi. Kekurangan dari pendekatan ini adalah sulit mencari lokasi dengan tanah dan iklim yang mempunyai karakteristik yang sama, tetapi status haranya bervariasi.

Pada pendekatan lokasi tunggal dan lokasi bekas percobaan pengaruh tanah dan cuaca dapat dipandang sama. Prinsip pendekatan ini adalah bahwa agroteknologi dapat dialihkan dari tanah pada suatu lokasi ke lokasi lain bila tanahnya termasuk dalam satu famili. Dengan demikian kalibrasi dengan pendekatan ini dilaksanakan pada satu lokasi untuk setiap famili tanah. Pada pendekatan ini status hara tanah merupakan status hara buatan dengan memberikan berbagai tingkat pemupukan agar diperoleh status hara yang diuji

mempunyai selang sangat lebar dari rendah sampai tinggi. Percobaan kalibrasi diletakkan pada tanah dengan status hara rendah, sehingga perlu waktu antara pembuatan status hara tanah dengan pelaksanaan percobaan kalibrasi. Kalibrasi dapat dilaksanakan setelah reaksi lambat dari pupuk dan tanah mencapai keadaan seimbang (*steady state*).

Percobaan tanggap tanaman terhadap pemupukan biasanya dilaksanakan pada musim kedua. Contoh tanah sebelum percobaan diambil dari setiap status buatan dan dianalisis dengan metode ekstraksi terbaik dari penelitian korelasi. Untuk kalibrasi P, takaran pupuk yang digunakan pada musim kedua misalnya 0, 20, 40, 60, dan 80 kg ha⁻¹. Dari penelitian kalibrasi diperoleh batas kritis hara tanah yang dapat ditentukan dengan menggunakan metode Cate dan Nelson (1965), atau dengan metode analisis keragaman yang dimodifikasi Nelson dan Anderson, (1977) dan Widjaja-Adhi (1986).

Hasil penelitian studi korelasi menunjukkan bahwa pengekstrak HCl 25% merupakan pengekstrak terbaik untuk analisis tanah P dan K di Jawa. Oleh karena itu percobaan kalibrasi pemupukan P dan K dilakukan dengan menggunakan pengekstrak HCl 25% di berbagai lokasi di Jawa (Adiningsih *et al.*, 1989). Contoh hubungan antara nilai uji tanah terekstrak HCl 25% dengan persen hasil disajikan pada Gambar 1. Kadar P dalam tanah 20 mg P₂O₅ (100 g)⁻¹ tanah merupakan batas kritis untuk tanaman padi sawah. Berdasarkan hasil penelitian tersebut ditetapkan bahwa tanah yang mempunyai kadar <20 mg P₂O₅ (100 g)⁻¹, 20 – 40 mg P₂O₅ (100 g)⁻¹, dan >40 mg P₂O₅ (100 g)⁻¹ tanah termasuk kelas rendah, sedang, dan tinggi.



Gambar 1. Hubungan kadar P terekstrak HCl 25% dengan persen gabah kering

bersih dari 18 lokasi percobaan di Jawa (Adiningsih *et al.*, 1989)

Batas kritis hara K lahan sawah di Jawa dipelajari dengan menghubungkan antara hasil analisis tanah dengan persen hasil. Hasil kalibrasi pemupukan K pada padi sawah menunjukkan bahwa batas kritis hara K terekstrak HCl 25% adalah 10 mg K₂O 100 g⁻¹ tanah (Puslittanak, 1992). Berdasarkan hasil kalibrasi tersebut selanjutnya ditetapkan status hara lahan sawah ditetapkan sebagai berikut: status rendah < 10 mg K₂O (100 g)⁻¹, sedang 10 – 20 mg K₂O (100 g)⁻¹ dan tinggi > 20 mg K₂O (100 g)⁻¹ tanah (Tabel 2).

Tabel 2. Kriteria kelas status hara P dan K tanah sawah (Puslittanak, 1992; Adiningsih *et al.*, 1989)

Kelas status hara tanah	Kadar hara terekstrak HCl 25% (mg 100 g) ⁻¹ tanah	
	P ₂ O ₅	K ₂ O
Rendah	< 20	< 10
Sedang	20 – 40	10 – 20
Tinggi	> 40	> 20

Kelas status hara P dan K tersebut digunakan sebagai dasar dalam pembuatan peta status P baik skala 1:250.000 maupun 1:50.000. Peta status hara P skala 1:250.000 telah dibuat di 18 provinsi, dan peta status hara P skala 1:50.000 telah dibuat di beberapa kabupaten pantai utara (pantura) Jawa dan beberapa kabupaten lainnya di luar Jawa yang dikerjakan oleh Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) dan pemerintah daerah setempat bekerja sama dengan Puslitbangtanak.

PETA STATUS HARA

Peta status hara menggambarkan dan memberikan informasi tentang sebaran dan luasan status hara dalam suatu wilayah. Dari peta tersebut dapat diketahui berapa luas tanah-tanah yang mempunyai status hara rendah, sedang dan tinggi dan di mana lokasinya. Peta status hara tanah skala 1:250.000 dapat

digunakan sebagai dasar dalam alokasi pupuk tingkat provinsi, sedang peta status hara tanah skala 1:50.000 dapat digunakan sebagai dasar menyusun rekomendasi pemupukan.

Peta status hara merupakan penyederhanaan (simplifikasi) dalam pemanfaatan hasil-hasil penelitian uji tanah. Dari penelitian uji tanah diperoleh klas status hara P dan K untuk tanaman padi sawah dengan pengestrak HCl 25%. Kemudian dari percobaan-percobaan kurva tanggap tanaman terhadap pemupukan P dan K padi sawah di berbagai tempat pada status hara P dan K tanah yang berbeda dapat disusun rekomendasi pemupukan untuk padi sawah. Rekomendasi pemupukan ini dapat digunakan bila diketahui status hara tanah yang akan dibuat rekomendasinya.

Status hara tanah dapat diketahui dengan cara mengambil contoh tanah di lapangan dan dianalisis di laboratorium. Jadi setiap kali akan membuat rekomendasi pemupukan pada suatu tempat/lokasi tertentu diperlukan contoh tanah dan analisis tanah. Hal ini tentu memerlukan waktu, tenaga dan dana yang tidak sedikit dan sangat rumit apabila akan diterapkan pada suatu kawasan yang luas. Apalagi petani sebagai pengguna akhir yang memanfaatkan rekomendasi pemupukan sebagian besar tidak mempunyai kemampuan untuk melakukan dan membayar pengambilan contoh tanah dan analisis tanah. Oleh karena itu peta status hara ini dibuat oleh Badan Litbang Pertanian (Puslitbangtanak dan BPTP di berbagai provinsi) dan sebagian atas kerjasama dengan pemerintah daerah (Bapeda dan Dinas Pertanian) untuk memudahkan para petani dan pengguna lainnya mendapatkan informasi mengenai status hara dan rekomendasi pemupukan.

Pengambilan contoh dan prosesing tanah komposit

Pengambilan contoh tanah yang baik merupakan tindakan awal yang sangat penting untuk mengurangi kesalahan dalam pembuatan peta status hara. Kesalahan pengambilan contoh tanah dapat terjadi pada alat yang digunakan, cara pengambilan dan pemberian label. Alat untuk mengambil contoh tanah adalah bor tanah, cangkul, sekop atau pisau. Prinsip yang perlu diingat adalah bahwa volume tanah, kedalaman pengambilan, ketebalan dari lapisan atas ke bawah untuk setiap anak contoh harus sama. Alat yang digunakan jangan yang kotor dan berkarat karena dapat terjadi kontaminasi dengan hara lain.

Contoh tanah komposit merupakan gabungan 10 – 15 anak contoh yang diambil dengan radius 50 m. Contoh tanah diambil pada kedalaman 20 cm atau

pada daerah perakaran. Contoh tanah dari anak contoh dimasukkan ke dalam ember dan dicampur secara homogen, kemudian diambil \pm 1 kg. Contoh tanah tidak boleh diambil dari tempat yang berada di bawah bekas tumpukan sisa hasil panen baik yang dibakar atau segar atau bekas tempat pengumpulan gulma. Label harus dibubuhkan saat pengambilan di lapangan, menggunakan alat tulis yang tidak dapat hilang. Label yang dicantumkan harus dapat mencirikan lokasi dan kode pengambilan yang menunjukkan personil yang mengambil dan urutan pengambilan. Contoh tanah harus dibersihkan dari batu, kerikil, gulma, atau sisa tanaman. Contoh tanah segera dikeringanginkan, ditumbuk dan disaring dengan saringan berdiameter 2 mm, kemudian dianalisis.

Status hara P tanah sawah

Program intensifikasi telah dilaksanakan pemerintah melalui program Bimas, Inmas, Insus dan Supra Insus, sejak akhir tahun enam puluhan. Takaran pupuk N, P dan K yang digunakan cukup tinggi. Sebagai akibat pemupukan fosfat terus-menerus dalam jangka waktu lama, diduga pada beberapa lokasi sawah intensifikasi di Jawa telah terjadi akumulasi P dalam tanah, karena sebagian besar pupuk P yang diberikan terikat dalam tanah. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi pupuk fosfat pada tanah sawah sangat rendah, hanya sekitar 10-20% dari jumlah pupuk yang diberikan.

Penelitian status hara P pada lahan sawah intensifikasi dan kalibrasinya telah dilaksanakan oleh Pusat Penelitian Tanah (Puslittan) di Jawa sejak tahun 1987. Hasil evaluasi kebutuhan P untuk padi sawah tahun 1987/1988 selama 2 musim tanam pada lahan intensifikasi, menunjukkan bahwa sebagian besar lahan sawah di Jawa dan Madura yang berstatus P sedang sampai tinggi tidak tanggap terhadap pemupukan fosfat (Adiningsih, 1987). Peta keperluan fosfat lahan sawah di Jawa dan Madura yang disusun Adiningsih *et al.* (1989) dapat digunakan sebagai arahan alokasi pupuk P dan pada kondisi tertentu dapat digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi pemupukan. Peta tersebut menunjukkan dari sekitar 3,6 juta ha lahan sawah di Jawa terdapat areal yang berstatus P tinggi, sedang dan rendah masing-masing 1,5; 1,7 dan 0,5 juta ha (Tabel 3). Selanjutnya Adiningsih *et al.* (1989) menyatakan bahwa takaran pemupukan untuk lahan sawah berstatus P tinggi dan sedang dapat diturunkan masing-masing menjadi 50% dan 75% dari takaran anjuran.

Sampai saat ini telah dihasilkan peta P skala 1:250.000 di 18 provinsi tersebar di Jawa, Sumatera, Sulawesi, Lombok, Bali dan Kalimantan dengan total luas sawah 7.507.440 ha. Sebagian besar lahan sawah di Indonesia berstatus P sedang dan tinggi, sedangkan yang berstatus P rendah hanya 17% (Tabel 3).

Tabel 3. Status hara P tanah sawah skala 1:250.000 di beberapa pulau di

Indonesia				
Pulau	Status hara P			Total
	Rendah	Sedang	Tinggi	
	1000 ha			
Jawa	543	1.658	1.452	3.653
Sumatera	428	1.081	771	2.280
Kalimantan Selatan	146	164	155	465
Bali	2	16	74	92
Lombok	0	12	111	123
Sulawesi	152	312	433	897
Total	1.271	3.243	2.996	7.510
	(17)	(43)	(40)	(100)

(--): persen

Sebagian besar lahan sawah di Sumatera berstatus hara P sedang dan tinggi, dan hanya sebagian kecil lahan sawah berstatus P rendah. Dari 2,3 juta ha⁻¹ lahan sawah yang sudah dipetakan masing-masing 0,8; 1,1 dan 0,4 juta ha⁻¹ berstatus P tinggi, sedang dan rendah. Luas lahan sawah di Kalimantan Selatan yang berstatus hara P rendah, sedang dan tinggi terlihat hampir sama, masing-masing 0,15; 0,16 dan 0,16 juta ha⁻¹. Di Sulawesi, sebagian besar lahan sawah berstatus P tinggi dan sedang, sementara di Pulau Lombok dan Bali sebagian besar lahan sawah berstatus P tinggi. Peta status hara Pulau Jawa skala 1:250.000 disajikan pada Lampiran 15.

Secara rinci dari delapan belas provinsi, lahan sawah berstatus P tinggi terluas yaitu Lampung, Sulawesi Selatan (Sulsel), Bali, Pulau Lombok, Bengkulu, dan Sulawesi Tengah (Sulteng). Sedangkan sisanya sebanyak 12 provinsi sebagian besar didominasi oleh lahan sawah berstatus P sedang dan lahan sawah yang berstatus P rendah luasannya lebih sempit (Tabel Lampiran 1).

Peta status hara P lahan sawah dengan skala 1:50.000 telah dibuat oleh Puslitbangtanak di tujuh kabupaten di Jabar dan Jawa Tengah (Jateng). Sedangkan peta status P yang telah dibuat oleh BPTP antara lain di Kabupaten Pidie, Aceh, tiga kabupaten di Sumut dan beberapa kabupaten/kecamatan di Riau, Jambi, Lampung, Jabar, Jateng, Jatim, Kalimantan Barat (Kalbar), Kalimantan Selatan (Kalsel), Kalimantan Timur (Kaltim), Sulawesi Selatan (Sulsel) dan Nusa Tenggara Barat (NTB) (Tabel Lampiran 2-7). Peta skala 1:50.000 merupakan peta yang dapat digunakan secara operasional dalam menyusun rekomendasi pemupukan. Satu contoh tanah komposit dalam peta tersebut mewakili luasan lahan sawah 25 ha, hal ini berarti kurang lebih mewakili satu

kelompok tani hamparan. Dalam satu kelompok tani diperkirakan status hara dan rekomendasi pemupukannya dalam selang kelas yang sama.

Sebagian besar lahan sawah di tujuh kabupaten di Jabar dan Jateng berstatus P sedang dan tinggi (Tabel 4). Lahan sawah berstatus P rendah hanya dijumpai di Karawang dan Pemalang dengan luasan yang sempit, sedang kabupaten yang lain tidak ada lahan sawah yang berstatus P rendah. Lahan sawah di Bali sebagian besar berstatus P rendah dan sedang, kecuali di Kecamatan Tabanan dan Penekel. Lahan sawah tiga kecamatan di Kabupaten Pidie semuanya berstatus P tinggi, tiga kabupaten di Sumut dan dua kecamatan di Kabupaten Kampar, Riau sebagian besar berstatus P rendah dan sedang, Kabupaten Kerinci, Jambi dan Lampung Tengah sebagian lahan sawah berstatus sedang dan tinggi. Lahan sawah beberapa kecamatan di beberapa kabupaten di Jawa sebagian besar berstatus P sedang dan tinggi. Lahan sawah di Kecamatan Sungai Kakap, Pontianak dan tiga kecamatan di Kabupaten Kutai sebagian besar berstatus P sedang dan tinggi. Lahan sawah di Gowa dan Maros, Sulsel dan Lombok Barat berstatus P tinggi dan sedang. Hal ini menunjukkan bahwa di daerah-daerah intensifikasi padi sawah tersebut telah terjadi akumulasi P yang cukup untuk memenuhi kebutuhan tanaman padi. Peta ini dapat digunakan untuk menyusun rekomendasi pemupukan P tingkat kecamatan.

Tabel 4. Status hara P tanah sawah skala 1:50.000 di beberapa Kabupaten Jabar dan Jateng

Provinsi/kabupaten	Status fosfat			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
	ha			
Jawa Barat				
Karawang	966	12.407	63.443	76.816
Subang	0	3.139	55.945	59.084
Indramayu	0	4.626	90.752	95.378
Cirebon	0	1.945	41.506	43.451
Jawa Tengah				
Brebes	0	279	34.134	34.413
Tegal	0	2.638	38.268	40.906
Pemalang	112	5.023	33.559	38.694
Total	1.078	30.057	357.607	388.742
	(0,28)	(7,73)	(91,99)	(100)

(---) : persen

Status hara K tanah sawah

Kalium merupakan hara makro ketiga yang dapat menjadi kendala bila hasil panen diangkut terus-menerus dan jerami tidak dikembalikan ke tanah.

Penyediaan K dari tanah sangat bervariasi tergantung sifat-sifat tanah, antara lain bahan induk tanah, kadar dan jenis liat, kadar bahan organik, drainase dan kapasitas tukar kation (KTK). Kadar K dalam tanah berkisar antara 0,5-2,5% dan sekitar 90-98% dari K tersebut terdapat dalam bentuk tidak tersedia, 1-10% dalam bentuk lambat tersedia dan 1-2% dalam bentuk mudah tersedia (Havlin *et al.*, 1999). Adapun K yang mudah tersedia adalah K larutan dan K diadsorpsi koloid tanah atau K-dd, sedangkan yang lambat tersedia adalah K dalam struktur mineral. Keempat bentuk K dalam tanah terdapat dalam keseimbangan yang dapat saling mengisi secara cepat bila padi sawah menyerap K dari larutan tanah. Pada sawah yang digenangi selama pertumbuhan, ketersediaan K relatif tinggi karena dinamika perubahan dan pergerakan K terjadi secara cepat. Air irigasi yang mengandung K dan pengembalian jerami yang mengandung K cukup tinggi dapat memperkecil kemungkinan lahan sawah kahat K. Kahat K tanaman padi hanya dijumpai pada tanah tertentu yaitu pada tanah yang miskin K, berdrainase buruk dan berkadar karbonat tinggi (Supartini *et al.*, 1991).

Dalam kurun waktu 20 tahun terakhir, Puslittan telah memetakan status hara K tanah sawah skala 1:250.000 bersamaan dengan pemetaan P di 18 provinsi di Indonesia dengan total luas 7.507.400 ha. Dari luasan tersebut sebanyak 51% lahan sawah yang sudah dipetakan berstatus K tinggi, 37% berstatus K sedang dan hanya 17% lahan sawah berstatus K rendah (Tabel 5). Luasan status hara lahan sawah secara rinci per provinsi dari 18 provinsi disajikan pada Tabel Lampiran 8. Lahan sawah yang berstatus K tinggi menyebar di Jawa, Sumatera, Bali dan Lombok, sedangkan lahan sawah yang berstatus K sedang paling banyak dijumpai di Sumatera dan Jawa. Pada peta skala tersebut terdapat dua tempat yaitu Bali dan Pulau Lombok yang tidak mempunyai lahan sawah berstatus K rendah dan sedang. Peta status hara K lahan sawah Pulau Jawa skala 1:250.000 disajikan pada Lampiran 16. Namun demikian bila dipetakan pada skala lebih detail (1:50.000) kemungkinan besar

di kedua pulau tersebut juga akan dijumpai lahan sawah yang berstatus K rendah dan sedang. Lahan-lahan sawah yang berstatus K tinggi umumnya terdapat pada lahan sawah intensifikasi dengan sistem irigasi teknis serta lahan sawah dengan bahan induk vulkan.

Tabel 5. Status hara K lahan sawah skala 1:250.000 beberapa Pulau Indonesia

Pulau	Status hara K			Total
	Rendah	Sedang	Tinggi	
	1.000 ha			
Jawa	473	1.172	2.008	3.653
Sumatera	246	1.181	858	2.280
Kalimantan Selatan	66	261	138	465
Bali	-	-	92	92
Pulau Lombok	-	-	123	123
Sulawesi	90	197	609	897
Total	875	2.806	3.829	7.510
	(12)	(37)	(51)	(100)

(--): persen

Hara K dalam tanaman padi lebih banyak terdapat dalam jerami padi, oleh karena itu pengembalian jerami padi hasil panen dapat mengurangi takaran pupuk KCl yang diberikan. Dengan pengembalian jerami ke dalam tanah, pupuk KCl disarankan hanya diberikan pada lahan sawah berstatus K rendah. Sedang pada lahan sawah berstatus K sedang dan tinggi tidak dianjurkan.

Status hara K lahan sawah beberapa kabupaten di pantura Jabar dan Jateng yang telah dipetakan dengan skala 1:50.000 disajikan pada Tabel 6. Lahan sawah berstatus K rendah banyak terdapat di Kabupaten Subang dan Karawang. Status hara K lahan sawah di Kabupaten Subang seimbang antara yang berstatus rendah, sedang dan tinggi. Lahan sawah berstatus K tinggi >90% terdapat di Kabupaten Indramayu, Cirebon, dan Brebes (Tabel 6). Peta ini sangat berguna untuk menyusun rekomendasi pemupukan kalium di tingkat kecamatan.

Tabel 6. Status hara K tanah sawah skala 1:50.000 beberapa kabupaten di Jabar dan Jateng

Provinsi/kabupaten	Status kalium			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
	ha			
Jawa Barat				
Karawang	7.296	15.322	54.207	76.816
Subang	19.249	17.433	22.402	59.084
Indramayu	1.615	3.154	90.609	95.378

Cirebon	775	3.105	39.571	43.451
Jawa Tengah				
Brebes	0	286	34.127	34.413
Tegal	0	1.569	39.337	40.906
Pemalang	422	2.623	35.649	38.694
Total	29.357	43.492	315.902	388.742
	(7,55)	(11,19)	(81,26)	(100)

(--): persen

Status hara K lahan sawah beberapa kabupaten di Bali, Sumatera, Jawa, Kalimantan, Sulsel dan Lombok juga telah dipetakan oleh BPTP dengan skala 1:50.000 (Tabel Lampiran 9-14). Sebagian besar lahan sawah Kabupaten Tabanan, Jembrana dan Badung (Bali), Kabupaten Garut (Jabar), Kulon Progo (Jogyakarta), Sragen (Jateng), Lumajang dan Pasuruan (Jatim), Kabupaten Maros dan Gowa (Sulsel) serta Kabupaten Lombok Barat (NTB) berstatus K tinggi. Lahan sawah beberapa kabupaten di Sumatera sebagian besar berstatus K sedang dan tinggi, kecuali di Lampung sebagian lahan sawah berstatus K rendah. Kecamatan Sungai Kakap, Pontianak dan Kecamatan Tenggarong, Tenggarong Sebrang dan Loakulu, Kutai berstatus K sedang dan tinggi, sedangkan lahan sawah di Kecamatan Haruyan, Kabupaten Hulu Sungai Tengah sebagian besar berstatus K rendah dan sedang.

Status hara sekunder (Ca, Mg dan S) tanah sawah

Hara Ca dan Mg dalam tanah dianalisis dengan metode NH_4OAc 1 N pH 7 sedang hara S dengan $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 500 ppm P. Hara Ca, Mg dan S diklasifikasikan berdasarkan batas kritis, yaitu lebih kecil dan lebih besar dari batas kritis. Klasifikasi kecukupan hara Ca, Mg dan S serta metode ekstraksi yang digunakan disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Metode ekstraksi dan klasifikasi batas kritis hara Ca, Mg dan S*)

Unsur hara	Metode ekstraksi yang digunakan	Klasifikasi batas kritis	
		Kahat (rendah)	Cukup (tinggi)
Ca	NH_4OAc 1 N pH 7	< 5 me (100 g) ⁻¹	> 5 me (100 g) ⁻¹
Mg	NH_4OAc 1 N pH 7	< 1 me (100 g) ⁻¹	> 1 me (100 g) ⁻¹
S	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 500 ppm P	< 10 ppm	> 10 ppm

*) Sumber : Puslitan, 1983; Purnomo, *et al.*, 1992

Status hara sekunder telah diteliti dan dipetakan oleh Puslitbangtanak beberapa tahun terakhir. Status hara Ca dan Mg skala 1:250.000 telah dipetakan di Kabupaten Blitar, Jombang dan Ngawi Provinsi Jatim dengan luasan masing-masing 51.193, 49.254 dan 50.648 ha. Berdasarkan hasil pemetaan diketahui bahwa semua lahan sawah di Kabupaten Blitar, Jombang dan Ngawi berstatus Ca tinggi dengan kadar Ca > 5 me Ca (100 g)⁻¹. Tidak demikian halnya dengan

status Mg tanah sawah, di Kabupaten Blitar sebagian besar berstatus Mg rendah seluas 42.686 ha (83%), sedangkan di Kabupaten Jombang dan Ngawi sebagian besar berstatus Mg tinggi mencapai 82% dari luas lahan sawah di masing-masing kabupaten (Tabel 8). Status hara S di ketiga kabupaten tersebut berdasarkan kriteria pada Tabel 7 sebagian besar termasuk tinggi (74 – 99% dari luas lahan sawah yang dipetakan).

Tabel 8. Luas lahan sawah berdasarkan status hara Ca dan Mg skala 1:250.000 di Kabupaten Blitar, Jombang dan Ngawi (Sofyan *et al.*, 2002)

Kabupaten	Luas lahan sawah berdasarkan status hara				
	Rendah		Tinggi		Jumlah ha
	ha	%	ha	%	
Blitar					
Ca	-	-	51.193	100	51.193
Mg	42.686	83	8.507	17	51.193
S	13.238	26	37.955	74	51.193
Jombang					
Ca	-	-	49.254	100	49.254
Mg	8.961	18	40.293	82	49.254
S	9.199	19	40.055	81	49.254
Ngawi					
Ca	-	-	50.648	100	50.648
Mg	9.188	18	41.460	82	50.648
S	687	1	49.961	99	50.648

Sebaran hara S dalam tanah sawah di Jawa telah dipetakan, namun pemetaan hara tersebut belum seintensif P dan K mengingat informasi dampak kahat S terhadap produktivitas padi sampai saat ini masih dianggap belum terlalu luas dan nyata. Namun demikian dalam jangka panjang sebaran lahan sawah kahat S terutama di luar Jawa pada lahan intensifikasi perlu dipetakan. Peta tersebut sangat berguna untuk menentukan alokasi kebutuhan pupuk S (ZA) dan rekomendasi pemupukan padi sawah.

Purnomo *et al.* (1992) telah mengambil contoh tanah sebanyak 573 tersebar pada lahan sawah di Jawa. Tanah-tanah tersebut dianalisis dengan pengekstrak $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 500 ppm P. Berdasarkan hasil penelitian tanggap tanaman padi terhadap S di lapangan, hara S diklasifikasikan menjadi tiga yaitu rendah, sedang dan tinggi masing-masing dengan kadar S <10 ppm, 10 – 30 ppm dan >30 ppm. Berdasarkan hasil analisis tanah di Jawa terdapat kecenderungan bahwa makin ke timur, makin sedikit contoh-contoh tanah yang mempunyai kandungan S sedang atau tinggi. Contoh tanah di Jabar dan Jateng sebagian besar berstatus S tinggi dan sedang kecuali contoh tanah yang berasal dari Jatim (Tabel 9).

Tabel 9. Jumlah dan penyebaran contoh-contoh tanah sawah lapisan atas di tiga provinsi di Jawa dibagi menurut kandungan belerang (Purnomo *et al.*, 1992)

Provinsi	Status S*			Persentase		
	Rendah	Sedang	Tinggi	Rendah	Sedang	Tinggi
Jawa Barat	29	92	77	5,1	16,1	13,4
Jawa Tengah	75	62	52	13,1	10,8	9,1
Jawa Timur	101	54	31	17,6	9,4	5,4
Jumlah	205	208	160	35,8	36,3	27,9

Catatan: *rendah (<10 ppm S), sedang (10-30 ppm S), tinggi (>30 ppm S)

Dari 94 lokasi penelitian, terdapat 12 lokasi yang menunjukkan pemupukan belerang memberikan kenaikan hasil 10% dibandingkan dengan perlakuan tanpa pupuk belerang. Tanggapan positif terhadap pemupukan belerang tidak selalu hanya diperoleh pada lokasi-lokasi yang tanahnya mempunyai status belerang rendah, tetapi juga pada tanah yang mempunyai status belerang sedang dan tinggi. Pada lokasi yang memberi tanggapan positif tersebut tidak terus-menerus memberikan tanggap yang sama dari musim ke musim.

Rata-rata kadar S dan standar deviasi dalam air pengairan di Jawa disajikan pada Tabel 10. Berdasarkan hasil analisis air pengairan terlihat bahwa semakin ke timur kadar S dalam air pengairan semakin meningkat dengan standar deviasi tertinggi di Jatim. Hal ini menunjukkan bahwa kadar S air pengairan di Jatim sangat tinggi dan bervariasi dibandingkan di Jabar dan Jateng. Kondisi ini juga yang mungkin menyebabkan tanggap tanaman padi terhadap pemupukan S sangat beragam karena adanya pengaruh S yang cukup besar dari air pengairan selain dari tanah sendiri.

Tabel 10. Rata-rata dan standar deviasi kadar S dalam air pengairan di Jawa yang diambil tahun 1990 (Santoso *et al.*, 1991)

Provinsi	Jumlah contoh	Rata-rata	Standar deviasi
----------	---------------	-----------	-----------------

		mg S l ⁻¹	
Jawa Barat	22	2,35	2,24
Jawa Tengah	25	2,88	1,40
Jawa Timur	15	9,35	11,00

Status hara mikro tanah sawah

Pemberian pupuk hara makro terus-menerus seperti urea, amonium sulfat, TSP/SP-36 dan KCl pada lahan sawah intensifikasi dapat mengakibatkan terkurasnya unsur hara mikro diantaranya seng (Zn). Kahat Zn dapat terjadi karena terbentuknya persenyawaan Zn-P, ZnCO₃, Zn(OH)₂, atau karena drainase buruk pada lahan sawah yang dapat terbentuk senyawa ZnS yang tidak larut. Pada tahun sembilan puluhan pemupukan Zn telah dimasukkan ke dalam paket rekomendasi dengan membuat pupuk TSP+Zn berkadar Zn 0,23% namun arealnya masih terbatas.

Meskipun ketersediaan Zn dalam tanah dipengaruhi oleh banyak faktor, berdasarkan hasil penelitian Al-Jabri *et al.* (1995) pemberian 5 kg Zn ha⁻¹ pada tanah sawah atau perendaman bibit padi ke dalam larutan 0,05% ZnSO₄ selama sekitar 5 menit dapat meningkatkan hasil padi pada sebagian besar lahan sawah. Menurut Mengel dan Kirby (1982) Zn yang diserap tanaman hanya <0,5 kg Zn ha⁻¹ sehingga pemberian 4 kg Zn ha⁻¹ masih efektif untuk 3-8 tahun. Untuk padi sawah pemberian Zn lebih baik dalam bentuk ZnSO₄ dan pemberian Zn ke dalam tanah kemudian diaduk sama baik dengan yang disebar di permukaan tanah, tetapi yang paling baik bila diberikan melalui air pengairan pada umur 2 minggu setelah tanam (Amer *et al.* 1980).

Peta status Zn disusun berdasarkan kadar Zn dalam tanah dengan menggunakan pengekstrak DTPA-TEA. Kadar Zn tanah sawah dibedakan ke dalam dua kelas, yaitu berkadar Zn >1 ppm dan <1 ppm. Hasil pemetaan status hara Zn lahan sawah di Jawa, Pulau Lombok dan Sulsel disajikan dalam Tabel 11. Data tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar lahan sawah di Jabar, Jateng, DI Yogyakarta, Jatim dan Pulau Lombok berstatus hara Zn tinggi (>1 ppm), kecuali di Sulsel.

Tabel 11. Luas lahan sawah berdasarkan status hara Zn di Jawa, Pulau Lombok dan Sulsel skala 1:250.000 (Al-Jabri *et al.*, 1991)

Provinsi	Luas sawah berdasarkan status Zn		Total
	<1 ppm	>1 ppm	
	ha		
Jawa Barat	247.437	951.606	1.199.043
Jawa Tengah	195.308	816.656	1.011.964

DI Yogyakarta	17.812	45.633	63.445
Jawa Timur	419.837	745.406	1.165.243
P. Lombok	53.750	68.915	122.655
Sulawesi Selatan	308.500	292.054	500.544
Jumlah	1.242.644 (29,85)	2.920.270 (70,15)	4.162.914

(--): persen

Status C-organik tanah sawah

Hasil analisis C-organik dari delapan provinsi di Indonesia disajikan pada Tabel 12. Lahan sawah di Indonesia terlihat mempunyai kadar C-organik yang relatif rendah. Dari 1.548 contoh tanah lahan sawah, 17% berkadar C-organik < 1%, 28% berkadar C-organik antara 1–1,5%, dan 20% berkadar C-organik antara 1,5–2%. Hal ini berarti bahwa status C-organik lahan sawah di Indonesia termasuk rendah ($\leq 2\%$), dan hanya 34% yang berkadar C-organik > 2%. Semakin ke timur kadar C-organik terlihat semakin rendah.

Tabel 12. Sebaran C-organik lahan sawah di delapan provinsi di Indonesia

Provinsi	Jumlah contoh	Kadar C-organik			
		< 1	1 – 1,5	1,5 - 2	> 2
		%			
Sumatera Barat	159	1	7	30	121
Sumatera Selatan	196	5	48	36	107
Kalimantan Selatan	88	2	12	19	55
Jawa Barat	136	2	7	41	86
Jawa Tengah	304	89	99	49	67
Jawa Timur	151	52	68	16	15
Pulau Lombok	319	109	156	45	9
Sulawesi Selatan	195	10	40	78	67
Jumlah contoh tanah	1.548	270 (18)	437 (28)	314 (20)	527 (34)

Sumber: Kasno *et al.*, (2003)

Keterangan : (----) = persen

PENUTUP

Rekomendasi pemupukan dapat ditetapkan dengan serangkaian penelitian uji tanah, antara lain penjajagan hara, studi korelasi dan kalibrasi uji tanah. Hasil penelitian penjajagan hara adalah informasi hara yang menjadi faktor pembatas utama bagi pertumbuhan tanaman. Penelitian korelasi menghasilkan pengekstrak

terbaik untuk analisis suatu tanah dan tanaman tertentu, sedangkan dari penelitian kalibrasi diperoleh batas kecukupan hara (rendah, sedang, dan tinggi) dan takaran pupuk untuk masing-masing status hara. Pengekstrak terbaik untuk analisis hara P dan K lahan sawah untuk tanaman padi varietas unggul biasa adalah HCl 25 %. Sebagian besar lahan sawah di 18 provinsi dalam peta berskala 1:250.000 maupun di beberapa kecamatan dalam peta berskala 1:50.000 berstatus hara P dan K sedang dan tinggi.

Rekomendasi pemupukan lahan sawah yang berstatus P rendah, sedang dan tinggi yang dianjurkan adalah 100, 75 dan 50 kg (TSP/SP-36) ha⁻¹ musim⁻¹. Lahan sawah yang berstatus hara K rendah direkomendasikan untuk dipupuk 50 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹, sedangkan yang berstatus sedang dan tinggi tidak perlu diberi pupuk K tetapi jerami dikembalikan ke tanah sebagai sumber bahan organik dan K.

Lahan sawah di Jawa umumnya mempunyai kadar hara Ca, Mg, S dan Zn yang cukup tinggi, namun di beberapa lokasi dengan luasan yang relatif lebih sempit mempunyai kadar hara yang rendah. Informasi tentang status hara makro sekunder (Ca, Mg, S) dan mikro (Zn, Cu, B, dan lain-lain) lahan sawah di Indonesia masih sangat sedikit sehingga banyak daerah yang belum dapat diketahui faktor-faktor pembatas hara untuk meningkatkan hasil padi. Oleh karena itu di masa datang penelitian status hara makro sekunder dan mikro di lahan sawah perlu diintensifkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiningsih, J.S. 1987. Penelitian pemupukan P pada tanaman pangan di lahan kering masam, hlm. 285-307 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Penggunaan Pupuk Fosfat. Cipanas, 29 Juni- 2 Juli 1987. Pusat Penelitian Tanah, Bogor.
- Adiningsih, J.S. and M. Sudjadi. 1983. Evaluation of different extracting methods for available potassium in paddy soils. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 1:5-10.
- Adiningsih, J.S., Agus Sofyan, dan Dedy Nursyamsi. 2000. Lahan sawah dan pengelolaannya. hlm. 165-196 *dalam* Sumber Daya Lahan Indonesia dan Pengelolannya. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Adiningsih, J.S., Moersidi S., M. Sudjadi, dan A.M. Fagi. 1989. Evaluasi keperluan fosfat pada lahan sawah intensifikasi di Jawa. hlm. 63-89 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk. Cipayung, 25 Nopember 1988.
- Al-Jabri, M. dan M. Soepartini. 1995. Teknik pemupukan hara Zn pada tanah sawah. hlm. 1-6 *dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat No. 2. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

- Al-Jabri, M., M. Soepartini, dan Mangku E. Suryadi. 1987. Pemilihan metoda uji Zn dan Cu pada tanah-tanah sawah dari Jawa Barat dan Jawa Timur dengan padi sebagai tanaman indikator. hlm. 271-295 *dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah. Cipayung, 21-23 Februari 1984, Pusat Penelitian Tanah, Bogor.
- Al-Jabri, M., M. Soepartini, dan Didi Ardi. 1991. Status hara Zn dan pemupukannya di lahan sawah. hlm. 427-464 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk V. Cisarua, 12-13 Nopember 1990. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Amer F., A. I. Rezk, and H. M. Khalid. 1980. Fertilizer Zine efficiency in flooded calcareous soil. *SSSAJ*. 44 (5):1.025-1.030.
- Baharsjah, S. 1991. Penghapusan subsidi pupuk suatu tinjauan ekonomi. hlm. 1-7 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk V. Cisarua, 12-13 Nopember 1990. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Cate, R.B. and L.A. Nelson. 1965. A Rapid method for corelation of soil test analysis with plant response data. *Int. Soil Testing*. North Carolina Univ.Exp.sta. Releigh. Bull.1.
- Cate, R.B. Jr. and L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation into two classes. *SSSAP* 35: 858-860.
- Fixen, P.E. and J. H. Grove. 1990. Testing soils for phosphorus. p. 141-172. *In*. Soil Testing and Plant Analysis. Third Edition. Ed. R.L. Westerman. SSSA.
- Havlin, J.L., James D. Beaton, Samuel L. Tisdale, and Werner L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management. *In* Prentice-Hall, Inc, Simon & Schuster/A Viacom Company Upper Saddle River, New Jersey 07458. 6^{ed}, p. 499.
- Kasno, A., Diah Setyorini, dan Nurjaya. 2003. Status C-organik lahan sawah di Indonesia. Pros. HITI, Padang.
- Melsted, S.W. and T. R. Peck. 1973. The principles of soil testing. *In*. L. M. Walsh and J. D. Beaton: Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisc. USA.
- Mengel, K. and E. A. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. Ed. International Potash Institute. Bern – Switserland.
- Moersidi, S., J. Prawirasumantri, W. Hartatik, A. Pramudia, dan M. Sudjadi. 1991. Evaluasi kedua keperluan fosfat pada lahan sawah intensifikasi di Jawa. hlm. 209-221 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk V. Cisarua, 12-13 Nopember 1990. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

- Nelson, L.A., and R.L. Anderson. 1977. Partitioning of soil test crop response probability. p. 19-38. *In* Peck T.R., J.T. Cope Jr., D.A. Witney (Eds.). Soil Testing: Corelation and Interpreting The Analytical Results. ASA Special Publ. No. 29. ASA-CSSA. Madison, Wisconsin, USA.
- Nursyamsi, D., D. Setyorini, dan I.P.G. Widjaja-Adhi. 1993. Penentuan kelas hara P terekstrak beberapa pengekstrak dengan metode analisis keragaman yang dimodifikasi. hlm. 217-235 *dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat: Bidang Kesuburan dan Produktivitas Tanah. Bogor, 18-21 Februari 1993. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Purnomo J., Djoko Santoso, Heryadi, dan Moersidi, S. 1992. Status belerang tanah-tanah sawah di Pulau Jawa. hlm. 103-112 *dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah: Bidang Kesuburan dan Produktivitas Tanah. Bogor, 22-24 Agustus 1989. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Puslittan. 1983. Kriteria Penilaian Hasil Analisis Tanah. Puslittan, Bogor.
- Puslittanak. 1992. Laporan Hasil Penelitian Status P Lahan Sawah di Sulawesi Selatan. Puslittanak, Bogor.
- Rayes, M.L. 1977. Pemilihan metode analisis dan kalibrasi uji tanah N, P, K dan S pada tanah sawah. Tesis Sarjana Pertanian. Fakultas Pertanian, Univ. Brawijaya, Malang.
- Rochayati, S., D. Setyorini, S. Suping, dan Ladiyani R., Widowati. 1999. Korelasi Uji Tanah Hara P dan K. Laporan Bagian Proyek Penelitian Sumberdaya Lahan. Puslittanak (Belum dipublikasikan)
- Santoso, D., Heryadi, Sukristiyonobowo, dan Joko Purnomo. 1991. Pemupukan belerang di lahan sawah. hlm. 241-252 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk V. Cisarua, 12-13 Nopember 1990. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Setyorini, D., L.R. Widowati, dan J. Sri Adiningsih. 2002. Validasi Model Rekomendasi Pemupukan Lahan Sawah. Laporan Akhir Kegiatan. Bagian Proyek Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Iklim dan PAATP. Puslitbangtanak, Bogor (Belum dipublikasikan)
- Skogley, E.O. 1994. Reinventing soil testing for the future. Soil Testing: Prospect for Improving Nutrient Recommendations. SSSA Special Publication No. 40. Madison, Wisconsin.
- Soepartini, M., Didi Ardi S., Tini Prihatini, W. Hartatik, dan D. Setyorini. 1991. Status kalium tanah sawah dan tanggap padi sawah terhadap pemupukan kalium. hlm. 187-207 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk V. Cisarua, 12-13 Nopember 1990. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

- Sofyan A., Diah Setyorini, Jojon Suryana, dan Endang Hidayat. 2002. Penelitian Identifikasi Kendala Peningkatan Produktivitas Lahan Sawah. Laporan Hasil Penelitian. Bagian Proyek Penelitian dan Pengembangan Kesuburan Tanah dan Iklim dan Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipatif. Balai Penelitian Tanah (Belum dipublikasikan).
- Sulaeman, M. Soepartini S., dan M. Sudjadi. 1984. Hubungan antara kadar belerang tersedia dalam tanah dengan respon tanaman padi sawah. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 3: 20-26.
- Team Pembina Uji Tanah. 1973. Penilaian terhadap Fuji Hira Kogyo Soil Test Kit untuk Daerah Madiun dan Ngawi. Laporan Penelitian No. 7/1973. Lembaga Penelitian Tanah, Bogor.
- Widjaja-Adhi, I P.G. 1986. Penentuan kelas ketersediaan hara dengan metode analisis keragaman yang dimodifikasi. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk*. 5: 23-28.
- Widjaja-Adhi, I P.G. and J.A. Silva. 1986. Calibration of soil phosphorus test for maize on Typic Paleudults and Tropeptic Eutruxox. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 6: 32-39.
- Widjaja-Adhi, I P.G., D.A. Suriadikarta, M.T. Sutriadi, I G.M. Subiksa, dan I W. Suastika. 2000. Pengelolaan, pemanfaatan, dan pengembangan lahan rawa. hlm. 127-164 *dalam* Sumber Daya Lahan Indonesia dan Pengelolaannya. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Tabel Lampiran 1. Status hara P lahan sawah skala 1:250.000 18 provinsi di Indonesia

Provinsi	Status hara P			Total
	Rendah	Sedang	Tinggi	
	1.000 ha			
Jawa Barat	236	454	523	1.213
Jawa Tengah	123	659	397	1.179
Jawa Timur	184	545	532	1.261
Lampung	18	48	148	214
Sumatera Selatan	146	252	32	430
Sumatera Barat	37	96	92	225
Kalimantan Selatan	146	164	155	465
Sulawesi Selatan	115	176	290	581
Bali	2	16	74	92
Pulau Lombok	0	12	111	123
Nangroe Aceh Darussalam	48	128	121	297
Sumatera Utara	53	302	175	530
Jambi	31	118	116	265
Riau	76	107	46	229
Bengkulu	19	30	41	90
Sulawesi Utara	7	51	31	89
Sulawesi Tengah	2	61	93	156
Sulawesi Tenggara	28	24	19	71
Total	1.271	3.243	2.996	7.510
	(17)	(43)	(40)	(100)

(--): persen

Tabel Lampiran 2. Status hara P lahan sawah di Bali (skala 1:50.000)

Kabupaten/ kecamatan	Status hara P			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Kab. Tabanan	ha			
Pupuan	806	1.197	122	2.125
Penebel	73	2.539	1.148	4.420
Baturiti	49	733	952	1.733
Marga	195	1.612	244	2.052
Kediri	830	2.711	220	3.761
Tabanan	24	659	1.270	1.954
Kerambitan	293	1.832	440	2.565
Selemadeg	1.954	2.882	977	2.251
Jumlah	4.884	14.165	5.373	24.422
Kab. Jembrana				
Mendoya	926	1.381	185	2.492
Pekutatan	543	235	23	801
Negara	1.411	1.092	214	2.717
Melaya	95	446	109	650
Jumlah	2.975	3.154	531	6.660
Kab. Badung & Kota Denpasar				
Denpasar Barat	1.127	332	188	1.647
Denpasar Timur	103	1.068	0	1.171
Denpasar Selatan	41	828	0	869
Kuta	895	936	1.027	2.858
Mengwi	2.086	3.410	311	5.807
Abian Semal	1.001	2.336	117	3.454
Petang	247	1.133	320	1.700
Jumlah	5.500	10.043	1.963	17.506

Tabel Lahiran 3. Status hara P lahan sawah beberapa kecamatan dan kabupaten di Sumatera (skala 1:50.000)

Prov./kab kecamatan	Status hara P			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Aceh/Pidie	ha			
Mutiara	0	0	3.422	3.422
Kembang Tanjung	0	0	1.539	1.539
Plumpang Tiga	0	0	4.681	4.681
Jumlah	0	0	9.642	9.642
Sumut				
Kab. Asahan	19.150	22.123	11.129	52.402
Kab. Tapsel	21.070	16.740	7.396	45.206
Kab. Mandailing Natal	9.200	5.354	4.141	18.695
Jumlah	49.420	44.217	22.666	115.303
Riau/Kampar				
Kampar	1.207	1.386	417	3.010
Tambang	55	832	67	954
Jumlah	1.262	2.218	484	3.964
Jambi				
Kab. Kerinci	1.051	4.403	11.762	17.216
Jumlah	1.051	4.403	11.762	17.216
Lampung				
Kab. Lampung Tengah	1.394	17.526	38.940	57.860
Jumlah	1.394	17.526	38.940	57.860

Tabel Lampiran 4. Status hara P lahan sawah beberapa kecamatan dan kabupaten di Jawa (skala 1:50.000)

Prov./kab kecamatan	Status hara P			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Jabar/Garut	ha			
Leles	0	90	793	883
Wanaraja	0	298	1.319	1.617
Tarogong	7	578	1.639	2.224
Banyuresmi	5	374	1.059	1.438
Karangpawitan	0	706	1.258	1.964
Jumlah	12	2.046	6.068	8.126
Jateng/ Sragen				
Masaran	27	1.191	5.703	6.921
Jumlah	27	1.191	5.703	6.921
DI. Yogyakarta/Kulonprogo				
Nanggulan	250	600	650	1.500
Girimulyo	550	150	400	1.100
Jumlah	800	750	1.050	2.600
Jatim/Lumajang & Pasuruan				
Kab. Lumajang	0	15.050	21.973	37.023
Kab. Pasuruan	714	5.950	25.027	31.691
Jumlah	714	21.000	47.000	68.714

Tabel Lampiran 5. Status hara P lahan sawah beberapa kecamatan dan kabupaten di Kalimantan (skala 1:50.000)

Prov./kab kecamatan	Status hara P			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Kalbar/Pontianak Sungai Kakap	413	5.669	2.356	8.438
Jumlah	413	5.669	2.356	8.438
Kalsel/Hulu Sungai Tengah Haruyan	1.221	1.768	547	3.536
Jumlah	1.221	1.768	547	3.536
Kaltim/Kutai Tenggarong	132	288	122	542
Tenggarong Sebrang	157	1.527	1.122	2.806
Loakulu	145	844	606	1.595
Jumlah	434	2.659	1.850	4.943

Tabel Lampiran 6. Status hara P lahan sawah dua kabupaten di Sulawesi Selatan (skala 1:50.000)

Kabupaten	Status hara P			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Maros	0	523	8.304	8.827
Gowa	0	0	20.538	20.538
Jumlah	0	523	28.842	29.365

Tabel Lampiran 7. Status hara P lahan sawah di Kabupaten Lombok Barat, NTB (skala 1:50.000)

Kecamatan	Status hara P			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Narmada	91	2.057	2.350	4.498
Kediri	0	921	3.009	3.930
Gerung	0	780	3.288	4.068
Tanjung	106	769	820	1.695
Kaliangga	72	849	626	1.547
Labuanapi	0	629	2.419	3.048
Gunungsari	0	93	0	93
Bayan	0	0	1.008	1.008
Jumlah	269	6.098	13.520	19.887

Tabel Lampiran 8. Status hara K lahan sawah skala 1:250.000 di 18 provinsi di Indonesia

Provinsi	Status hara K	Total
----------	---------------	-------

	Rendah	Sedang	Tinggi	
	1.000 ha			
Jawa Barat	226	496	491	1.213
Jawa Tengah	175	330	674	1.179
Jawa Timur	72	346	843	1.261
Lampung	104	59	56	214
Sumatera Selatan	13	261	156	430
Sumatera Barat	50	111	64	225
Kalimantan Selatan	66	261	138	465
Sulawesi Selatan	27	89	465	581
Bali	-	-	92	92
Pulau Lombok	-	-	123	123
Nangroe Aceh Darussalam	12	56	229	297
Sumatera Utara	10	430	90	530
Jambi	20	140	105	265
Riau	9	83	137	229
Bengkulu	28	41	21	90
Sulawesi Utara	9	40	40	89
Sulawesi Tengah	32	33	91	156
Sulawesi Tenggara	22	35	13	71
Jumlah	875	2.806	3.829	7.510
	(12)	(37)	(51)	(100)

(--): persen

Tabel Lampiran 9. Status hara K lahan sawah di Bali (skala 1:50.000)

Kabupaten/ kecamatan	Status hara K			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Kab. Tabanan	ha			
Pupuan	391	1.099	635	2.125
Penebel	317	1.319	2.784	4.420
Baturiti	24	879	830	1.733
Marga	98	513	1.441	2.052
Kediri	0	122	3.639	3.761
Tabanan	73	782	1.099	1.954
Kerambitan	0	611	1.954	2.565
Selemadeg	1.050	3.955	806	5.811
Jumlah	1.953	9.280	13.188	24.421
Kab. Jembrana				
Mendoya	0	163	2.329	2.492
Pekutatan	16	401	384	801
Negara	0	55	2.662	2.717
Melaya	0	6	644	650
Jumlah	16	625	6.019	6.660

Badung & Kota Denpasar				
Denpasar Barat	91	361	1.194	1.647
Denpasar Timur	0	68	1.103	1.171
Denpasar Selatan	0	0	869	869
Kuta	0	569	2.289	2.858
Mengwi	0	505	5.302	5.807
Abian Semal	0	2.292	1.162	3.454
Petang	0	951	748	1.700
Jumlah	91	4.746	12.669	17.506

Tabel Lampiran 10. Status hara K lahan sawah beberapa kecamatan dan kabupaten di Sumatera (skala 1:50.000)

Prov./kab kecamatan	Status hara K			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Aceh/Pidie				
Mutiara	80	0	3.342	3.422
Kembang Tanjung	0	0	1.539	1.539
Plumpang Tiga	0	0	4.681	4.681
Jumlah	80	0	9.562	9.642
Sumut				
Kab. Asahan	906	15.080	35.416	52.402
Kab. Tapsel	6.953	28.633	9.620	45.206

Kab. Mandailing Natal	583	7.792	10.320	18.695
Jumlah	8.442	51.505	55.356	115.303
Riau/Kampar				
Kampar	415	1.229	1.366	3.010
Tambang	0	14	940	954
Jumlah	415	1.243	2.306	3.964
Jambi				
Kab. Kerinci	329	4.008	12.879	17.216
Jumlah	329	4.008	12.879	17.216
Lampung				
Kab. Lampung Tengah	43.609	10.588	3.663	57.860
Jumlah	43.609	10.588	3.663	57.860

Tabel Lampiran 11. Status hara K lahan sawah beberapa kecamatan dan kabupaten di Jawa (skala 1:50.000)

Prov./kab kecamatan	Status hara K			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	

	ha			
Jabar/Garut				
Leles	0	360	523	883
Wanaraja	0	979	638	1.617
Tarogong	43	422	1.759	2.224
Banyuresmi	47	354	1.037	1.438
Karangpawitan	286	1.103	575	1.964
Jumlah	376	3.218	4.532	8.126
Jateng/ Sragen				
Masaran	5.874	1.047	0	6.921
Jumlah	5.874	1.047	0	6.921
DI. Yogyakarta/Kulonprogo				
Nanggulan	495	195	810	1.500
Girimulyo	450	500	50	1.100
Jumlah	1.000	695	860	2.600
Jatim/Lumajang & Pasuruan				
Kab. Lumajang	1.075	5.031	30.917	37.023
Kab. Pasuruan	357	4.403	26.931	31.691
Jumlah	1.432	9.434	57.848	68.714

Tabel Lampiran 12. Status hara K lahan sawah beberapa kecamatan dan kabupaten di Kalimantan (skala 1:50.000)

Prov./kab kecamatan	Status hara K			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
Kalbar/Pontianak	ha			
Sungai Kakap	575	4.881	2.982	8.438
Jumlah	575	4.881	2.982	8.438
Kalsel/Hulu Sungai Tengah				
Haruyan	1.450	1.863	223	3.536
Jumlah	1.450	1.863	223	3.536
Kaltim/Kutai				
Tenggarong	194	244	104	542
Tenggarong Sebrang	519	1.712	575	2.806
Loakulu	113	944	538	1.595
Jumlah	826	2.900	1.217	4.943

Tabel Lampiran 13. Status hara K lahan sawah 2 kabupaten di Sulawesi Selatan (skala 1:50.000)

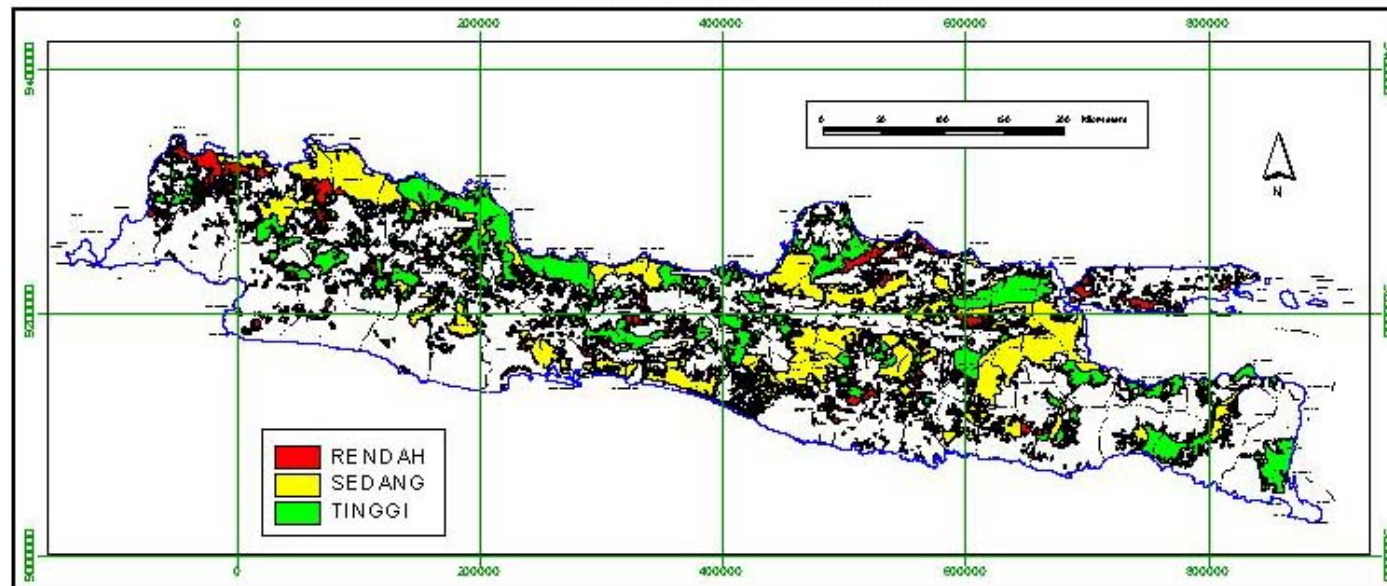
Kabupaten	Status hara K			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
	ha			
Maros	0	370	8.457	8.827
Gowa	0	0	20.538	20.538
Jumlah	0	370	28.995	29.365

Tabel Lampiran 14. Status hara K lahan sawah di Kabupaten Lombok Barat, NTB (skala 1:50.000)

Kecamatan	Status hara K			Jumlah
	Rendah	Sedang	Tinggi	
	ha			
Narmada	0	141	4.357	4.498
Kediri	0	0	3.930	3.930
Gerung	0	0	4.063	4.068
Tanjung	0	282	1.411	1.695
Kaliangga	0	362	1.185	1.547
Labuanapi	0	0	3.048	3.048
Gunungsari	0	0	93	93
Bayan	0	0	1.008	1.008
Jumlah	0	785	19.095	19.887

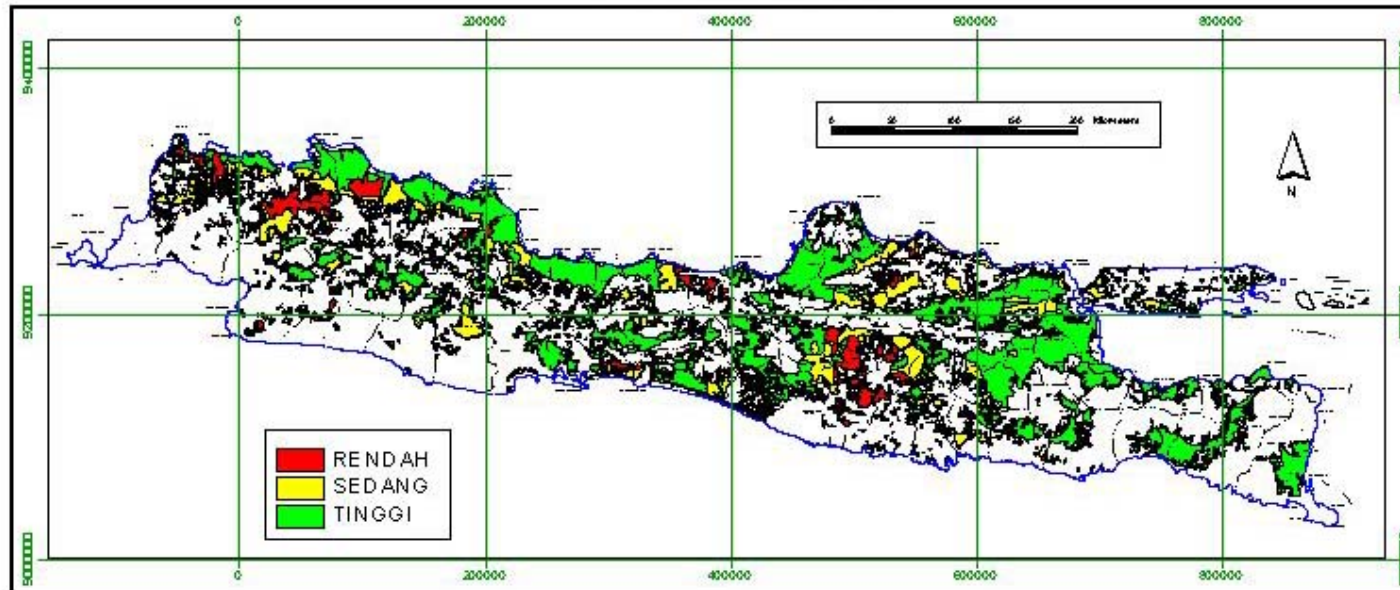
Lampiran 15. Peta status P di Pulau Jawa

PETA STATUS FOSFAT TANAH SAWAH DI PULAU JAWA



Lampiran 16. Peta status K di Pulau Jawa

PETA STATUS KALIU M TANAH SAWAH DI PULAU JAWA



4. TEKNOLOGI PENGELOLAAN HARA LAHAN SAWAH BUKAAN BARU

Didi Ardi Suriadikarta dan Wiwik Hartatik

Yang dimaksud dengan sawah bukaan baru adalah lahan kering yang dikonversi menjadi lahan sawah dengan lapisan tapak bajak belum terbentuk. Lapisan tapak bajak menurut Kawaguchi dan Kyuma (1977) di Jepang akan terbentuk antara 10-40 tahun.

Dalam rangka mempertahankan swasembada beras dan memantapkan ketahanan pangan nasional pemerintah telah melaksanakan program intensifikasi pertanian padi dan ekstensifikasi lahan sawah. Dalam program ekstensifikasi areal pertanian keluar Jawa, pemerintah telah membuka areal persawahan baru di Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi. Sementara ekstensifikasi berlangsung, konversi lahan sawah untuk nonpertanian juga terus terjadi. Dalam kurun waktu 20 tahunan lahan sawah yang dikonversi sekitar 1,6 juta ha, sedang lahan sawah bukaan baru sekitar 3,2 juta ha, jadi secara agregat luas lahan sawah bertambah sekitar 1,6 juta ha. Pada tahun 1994 lahan sawah bukaan baru di Sumatera terletak di Provinsi Riau, Bengkulu, Sumatera Selatan (Sumsel) dan Lampung yang meliputi luas 9.927 ha, sedangkan di Kalimantan dilaksanakan pada tiga provinsi Kalimantan Barat (Kalbar), Kalimantan Tengah (Kalteng), dan Kalimantan Selatan (Kalsel) seluas 7.201 ha, sedangkan di Sulawesi Tengah (Sulteng) seluas 1.630 ha. Area bukaan baru itu umumnya marjinal seperti: Histosol, Entisol, Inceptisol, Ultisol, Oxisol, dan Spodosol. Sebaran jenis tanah sawah bukaan baru ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Sebaran luas area lahan sawah bukaan baru (%) pada provinsi di Sumatera dan Kalimantan + Sulawesi

No	Jenis tanah	Sumatera	Kalimantan + Sulawesi
		%	%
1.	Inceptisol	17,7	55,4
2.	Entisol	1,5	4,1
3.	Ultisol	62,8	15,8
4.	Histosol (gambut)	12,9	16,3
5.	Oxisol	5,0	8,1
6.	Spodosol	0,1	0,3
7.	Total (%)	100	100

Sumber: Suharta dan Sukardi, 1994.

Berdasarkan sifat-sifat tanah tersebut maka tanah sawah bukaan baru perlu perlakuan khusus untuk memperbaiki sifat kimia melalui ameliorasi dan pemupukan, penggunaan varietas unggul, serta jaminan ketersediaan air irigasi.

PERUBAHAN SIFAT-SIFAT KIMIA SAWAH BUKAAN BARU

Peningkatan kelarutan besi fero

Pembukaan sawah bukaan baru akan menghadapi beberapa masalah antara lain: (a) kebutuhan air untuk pelumpuran cukup banyak; (b) produktivitas tanah yang masih rendah; dan (c) proses perubahan fisikokimia sedang berlangsung akibat penggenangan dapat mengganggu pertumbuhan tanaman, seperti keracunan besi atau mangan (Nursyamsi *et al.*, 1996). Produktivitas tanah yang rendah berkaitan dengan kemasaman tanah antara lain: (a) konsentrasi toksik Al dan Mn; (b) kekahatan Ca dan Mg; (c) kemudahan K tercuci; (d) jerapan P, S dan Mo; (e) pengaruh buruk dari H⁺; serta (f) hubungan tata air dan udara. Kondisi reduksi akan meningkatkan ketersediaan besi fero dalam tanah yang dalam konsentrasi tertentu bersifat racun terhadap tanaman padi.

Namun kondisi reduktif dapat berpengaruh positif dalam peningkatan pH tanah dan ketersediaan hara P. Penggenangan pada tanah mineral masam bukaan baru menyebabkan terjadinya reduksi besi feri menjadi besi fero. Konsentrasi besi fero setelah sekitar 3–4 minggu penggenangan meningkat sampai 600 ppm (Ponnamperuma, 1977). Pada kondisi ini kadar Fe²⁺ pada tanaman padi bisa lebih 300 ppm yang merupakan batas kritis keracunan besi pada tanaman padi.

Pada sawah bukaan baru di Lampung, Sumsel, Jambi, Riau, Sumatera Barat (Sumbar), dan Bengkulu umumnya tanaman padi mengalami keracunan besi (Zaini *et al.*, 1987). Keracunan besi dijumpai pula pada tanah sulfat masam di lahan sawah pasang surut, dan tanah mineral masam yang disawahkan yaitu yang jenis tanahnya tergolong dari ordo Oxisol dan Ultisol dan tanah Aluvial yang berdrainase jelek (van Bremen and Moorman, 1978).

Keracunan besi pada lahan sawah bukaan baru mengakibatkan produksinya rendah atau bahkan tanaman tidak berproduksi. Pada tanah Oxisol di Sitiung Sumbar penggenangan menyebabkan konsentrasi Fe dan Mn yang larut dalam air meningkat, dan terserap oleh tanaman padi yang menyebabkan keracunan. Daun padi menunjukkan klorosis. Tanaman padi akan keracunan besi apabila kadar besi dalam tanaman melebihi 300 ppm (Yusuf *et al.*, 1990). Tanaman padi fase vegetatif dapat mengalami keracunan besi, kalau kadar Fe dalam tanah >2.000 ppm Fe (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 1993). Gejala keracunan besi pada tanaman padi diindikasikan adanya bintik-bintik coklat pada daun, mulai dari pucuk kemudian menyebar ke helai daun, pertumbuhan tanaman kerdil, anakan terbatas dan daun menyempit, perakaran jarang, pendek, kasar dan terselaput warna coklat atau kemerahan. Pada keracunan besi yang parah daun bagian bawah mengering dan bagian atas berwarna kuning kemerahan (Ismunadji dan Roechan, 1988). Selain itu serapan

hara terhambat akibat perakaran tidak berkembang karena diselimuti besi oksida. Keracunan besi dapat menurunkan hasil padi 52-75% (Ismunadji dan Sabe, 1988).

Keracunan besi terlihat bila kadar besi dalam tanah 20–40 mg l⁻¹ (van Breemen and Moorman, 1978). Menurut Van Mensvoort *et al.*, (1985) bila kadar hara lain sangat rendah atau dalam keadaan hara tidak seimbang, keracunan besi akan nampak bila kadar besi dalam tanah 30 mg l⁻¹ (Gambar 1).

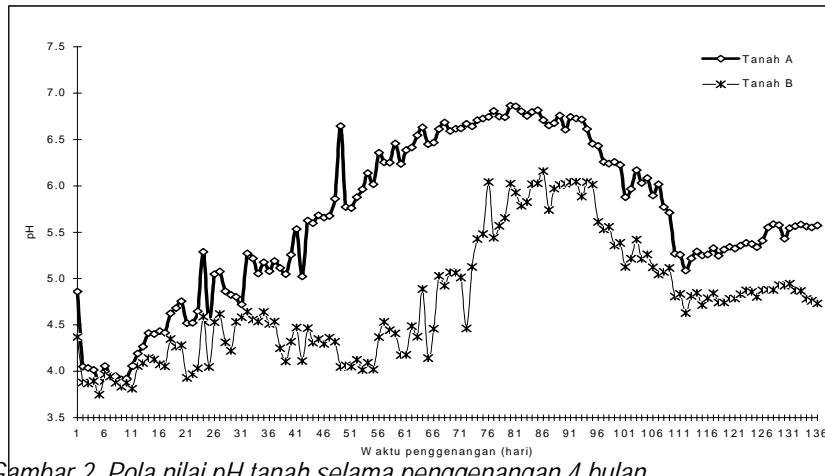


Gambar 1. Keracunan besi (*iron toxicity*) pada tanaman padi (Van Breemen and Moorman, 1978)

Pada tanah sawah bukaan baru yang keracunan besi umumnya juga menunjukkan kahat unsur hara yang lain. Menurut Ottow *et al.* (1982) keracunan besi pada tanaman padi di Asia Tenggara dan Afrika terjadi karena kahat beberapa hara, dimana pH berkisar antara 3-7,2; kadar besi 290-1.000 ppm, kadar Mn tinggi dan kadar P, K, Ca, Mg dan Zn rendah. Kahat beberapa hara ini pada tanaman disebabkan rendahnya kemampuan akar menyerap hara, sehingga besi fero secara langsung diserap lebih banyak oleh tanaman. Kahat P, K, Ca dan Mg lebih mempengaruhi terjadinya keracunan besi daripada adanya kadar besi fero yang tinggi. Status kesuburan tanah yang rendah pada lahan sawah bukaan baru pada jenis tanah Ultisol di Tugumulyo, Sumsel, menyebabkan tanaman padi keracunan besi. Pemupukan 767 kg SP-36 ha⁻¹ nyata meningkatkan hasil padi (Kasno *et al.*, 2000).

Peningkatan pH dan ketersediaan hara

Hasil penelitian Hartatik (1998), waktu penggenangan pada tanah bukaan baru (tanah A dan B) sangat berpengaruh terhadap nilai pH tanah. pH tanah meningkat dari 4,5 pada tanah A dan 4,6 pada tanah B menjadi 6,8 dan 6,2 (Gambar 2). Tanah A adalah tanah sawah bukaan baru 5 tahun, dan tanah B sawah bukaan baru 1 tahun.



Gambar 2. Pola nilai pH tanah selama penggenangan 4 bulan

Penggenangan, selain meningkatkan pH, P-tersedia, Fe dan Mn, juga meningkatkan kadar N, K dan Ca dapat ditukar, Si dan Mo serta menurunkan ketersediaan Cu dan Zn (Ponnamperuna, 1976).

Lahan untuk sawah irigasi bukaan baru umumnya mempunyai status kesuburan tanah yang rendah dan sangat rendah. Tanah-tanah di daerah Sumatera walaupun bahan induknya volkan tetapi umumnya volkan tua dengan perkembangan lanjut, oleh sebab itu miskin hara, dengan kejenuhan basa rendah bahkan sangat rendah. Kandungan bahan organik, hara N, P, K dan kapasitas tukar kation (KTK) umumnya rendah. Kecuali di Sulteng (Lambunu) sawah irigasi disini mempunyai kesuburan tanah yang lebih baik, karena tanahnya berkembang dari bahan aluvium yang kaya mika (Suharta dan Sukardi, 1994).

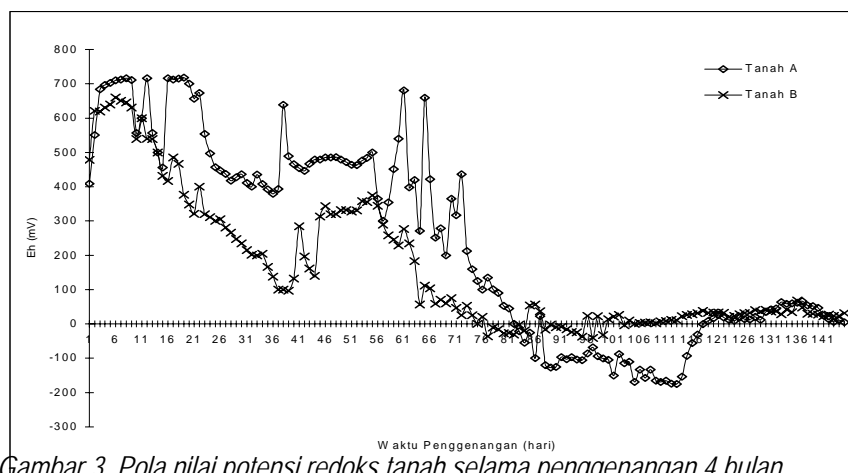
Penggenangan pada sawah bukaan baru berpengaruh positif terhadap kesuburan tanah, karena sebagian unsur-unsur hara lebih tersedia (De Datta, 1981; Ponnamperuma, 1972 dan 1976). Penggenangan pada tanah Podsolik di Sitiung meningkatkan pH dari 5-6,8 setelah tiga minggu penggenangan, dan stabil pada minggu berikutnya. Fosfor tersedia meningkat dari 2,9 menjadi 4,75 ppm pada minggu pertama penggenangan dan mencapai maksimum 7,4 ppm pada minggu keenam, dan cenderung menurun pada minggu berikutnya. Tanpa

penggenangan, P-tersedia berkisar pada kadar 2-2,5 ppm. Adiningsih dan Sudjadi (1983) mengemukakan bahwa peningkatan P-tersedia oleh penggenangan sangat kecil dibandingkan unsur hara lainnya, karena umumnya tanah mineral masam yang disawahkan P tersedianya sangat rendah. Hal ini diduga adanya fiksasi Al dan Fe oksida yang cukup tinggi.

Penurunan potensial redoks

Potensial redoks (reduksi-oksidasi) adalah suatu ukuran yang dipergunakan untuk mengukur adanya perpindahan elektron (e^-). Dengan demikian, potensial redoks erat hubungannya dengan proses reduksi dan oksidasi (redoks). Perubahan potensial redoks merupakan parameter yang paling penting untuk menentukan sifat elektro kimia suatu tanah sawah yang tergenang. Pada sawah bukan baru perubahan potensial redoks ini menjadi sangat penting karena mempunyai karakter tersendiri berbeda dengan sawah yang sudah dibuka lama yang dicirikan oleh nilai potensial redoks sangat rendah atau negatif.

Pada tanah sawah bukaan baru perubahan Eh ini terjadi sangat drastis dari positif ke negatif sesuai dengan lamanya penggenangan seperti disajikan pada Gambar 3. Terjadi penurunan Eh dari 646 dan 716 mV menjadi -100 mV.



Gambar 3. Pola nilai potensi redoks tanah selama penggenangan 4 bulan

Pengaruh perubahan potensial redoks atau Eh dan pH terhadap erapan P, kelarutan besi dan hara lain diteliti di laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan Eh akan berpengaruh terhadap daya sangga P tanah dengan nilai berkisar 200-6.000 mg P kg^{-1} tanah. Besi sudah mulai tereduksi pada Eh 400 mV dan memberikan kadar besi terlarut tertinggi sebesar 59 ppm dan pada Eh terendah (-300 mV), kadar Fe yang dapat tereduksi masih tergolong rendah.

Perubahan Eh berpengaruh terhadap kelarutan Mn, Cu, Zn, NO_3^- , NH_4^+ dan SO_4^{2-} . Tanah sawah bukaan baru Hapludox di Lampung tidak menunjukkan potensi keracunan Fe dan Mn, hal ini disebabkan rendahnya kadar Fe dan Mn yang dapat direduksi, namun rendahnya kadar unsur hara lain dapat menyebabkan tanaman peka terhadap keracunan besi (Sulaeman *et al.*, 1997).

Penggenangan pada tanah Ultisol di Tugumulyo, Sumsel, yang baru dibuka 5 tahun dan 1 tahun, meningkatkan kadar Fe terlarut berturut-turut dari 0,33 menjadi 74,13 ppm dan dari 0,07 menjadi 62,07 ppm. Mangan, seng, dan tembaga terlarut berkurang dengan penurunan Eh, demikian juga kadar nitrat, amonium, kalium dan magnesium menurun dengan semakin rendahnya nilai potensial redoks. Tetapi kadar sulfat meningkat sampai Eh 115 mV, kemudian menurun kembali sampai Eh -72 mV pada tanah yang baru dibuka 1 tahun. Pemberian Fe 200 ppm pada tanaman padi sudah menunjukkan gejala *bronzing*, meningkatkan kadar Fe tanaman dan menurunkan serapan hara P, K, Ca, Mg dan meningkatkan nisbah Fe/P, Fe/K dan Fe/Ca tanaman (Hartatik, 1998).



Gambar 4. Kekurangan unsur kalium (*Potassium deficiency*) pada tanaman padi (van Breemen and Moorman, 1978)

Selanjutnya Hartatik (1998) mengemukakan Eh tanah menurunkan daya sangga P tanah kemudian meningkat kembali pada Eh 100 dan 300 mV. Penurunan Eh meningkatkan kapasitas erap P. Pada tanah yang baru dibuka 5 tahun kapasitas erap P tertinggi terjadi pada Eh -100 mV dan tanah yang baru dibuka 1 tahun pada Eh 300 mV. Perbedaan nilai Eh disebabkan kandungan besi oksida kedua tanah berbeda. Kebutuhan pupuk P untuk mencapai 0,02 ppm terlarut pada tanah yang baru dibuka 5 tahun yaitu: 394 kg SP-36 ha⁻¹ dan pada tanah yang baru dibuka 1 tahun yaitu: 280 kg SP-36 ha⁻¹, kebutuhan pupuk P

yang sedikit lebih rendah ini diduga pada tanah yang baru dibuka 5 tahun lebih banyak besi dalam bentuk amorf yang mengfiksasi P (Gambar 4).

Tanah kahat hara N umum terjadi, dan pada tanah Latosol sering kandungan hara N, P dan K rendah. Walaupun mempunyai KTK yang cukup tinggi, dan cukup basa-basa, kadar Mn cukup (Tabel 2), tetapi mempunyai koefisien absorpsi P yang tinggi. Hal ini sangat erat hubungannya dengan kahat P dalam tanaman.

Tabel 2. Hasil analisis tanah pada dua lokasi di Jawa Barat.

Jenis analisis	Lokasi contoh tanah	
	Nagrak	Kosambi
pH	5,4	4,6
KTK (me 100 g ⁻¹)	33,4	13,8
Kation dapat ditukar (me 100 g ⁻¹):		
Ca	12,0	6,5
Mg	10,5	5,0
K	0,79	0,28
Na	0,57	0,41
C-organik (%)	6,0	1,7
P Koefisien absorpsi	1.397	756
Fe aktif (%)	1,20	0,92
Mn (%)	292	357

Sumber: Tanaka, A. dan S. Yoshida (1970).

Kekahatan hara dapat pula terjadi pada tanah alluvial pantai yang disawahkan. Pada tanah alluvial pantai yang bertekstur berat menunjukkan kekahatan hara, seperti di Lohbener dan Jubleng, Jabar, yang ditandai oleh daun bagian bawah berwarna coklat kegelapan yang akhirnya mati, daun bagian atas hijau gelap dan menggulung. Kadang-kadang gagal untuk membuat pembibitan. Warna daun akan menjadi kuning kecoklatan atau mempunyai bintik coklat pada daun yang menyempit. Dalam tanaman kandungan P dan K rendah, tetapi kadar besi sangat tinggi. Kadang-kadang kadar Na tinggi, kemungkinan karena dipengaruhi oleh air laut yang masuk.

Mentek atau Omo merah, atau "Prakeke" itu merupakan penyakit padi pada lahan sawah kahat hara N dan P. Tetapi ada yang berpendapat penyakit "Mentek" itu disebabkan adalah virus. Baru-baru ini ditemukan juga penyakit tungro yang juga terdapat di Indonesia yang gejalanya sama dengan Mentek. Keduanya disebut penyakit merah yang disebabkan oleh virus. Telah ditemukan varietas yang tahan terhadap penyakit merah ini baik Mentek maupun Tungro adalah padi varietas: Peta, Bengawan, Intan, dan Mas.

Perubahan sifat-sifat kimia tanah pada sawah bukaan baru pada tanah marjinal menjadi lahan sawah yang potensial di Indonesia memerlukan sekitar waktu 5-30 tahun, hal ini sangat tergantung pada tingkat irigasi, kandungan besi tanah seperti kelarutan besi fero yang tinggi akan menurun jika didrain, dan pengelolaan lahan oleh petani.

TEKNOLOGI PENGENDALIAN KERACUNAN BESI DAN KAHAT HARA PADA SAWAH BUKAAN BARU

Berdasarkan hasil penelitian seperti diuraikan pada bab sebelumnya, keracunan besi disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu: meningkatnya kelarutan besi fero, pH tanah masam, kahat hara P, K, Ca, Mg dan Zn atau kombinasi beberapa faktor di atas. Untuk mengendalikan keracunan besi tersebut diperlukan perbaikan: a) lingkungan tumbuh seperti; (1) penggenangan awal untuk menghindari peningkatan Fe^{2+} sampai puncak; (2) peningkatan penyediaan O_2 di permukaan tanah dengan memutuskan aliran air rembesan; dan (3) ameliorasi dan pemupukan untuk meningkatkan keseimbangan hara; dan (b) penanaman varietas tanaman yang sesuai (*adaptif*).

Perbaikan lingkungan tumbuh

Pengendalian drainase dan pencucian

Pengairan terputus dapat menanggulangi keracunan besi pada lahan sawah bukaan baru. Perlakuan pengairan terputus dapat mengurangi laju reduksi Fe^{+2} dan Mn^{+2} yang meracuni tanaman. Namun demikian penerapan pengairan terputus di lapangan harus hati-hati, karena selain Fe dan Mn yang tercuci, kation basa-basa seperti Ca, Mg, K, dan N juga ikut tercuci (Hartatik *et al.*, 1997; Widowati *et al.*, 1997). Pengairan terputus pada sawah bukaan baru Inceptisols di Muarabeliti menurunkan kadar Ca-dd, K-dd pada kondisi tanah diolah, sedangkan pada Ultisol di Tatakarya selain kedua unsur di atas juga menurunkan Mg-dd dan kejenuhan basa baik pada kondisi tanah diolah maupun tidak (Nursyamsi *et al.*, 2000).

Zaini *et al.* (1987) melaporkan bahwa drainase terputus, pengeringan selama satu minggu dan penggenangan 1-2 minggu, mulai saat tanam sampai 30 hari sebelum panen, meningkatkan hasil 37 dan 51% dibandingkan penggenangan terus-menerus (Tabel 3).

Perlakuan drainase terputus berpengaruh positif karena pengeringan akan menurunkan kelarutan Fe^{2+} , sehingga serapan Fe berkurang, di sisi lain serapan hara P, K, Ca dan Mg tanaman meningkat (Tabel 4).

Tabel 3. Pengaruh drainase terputus terhadap hasil padi sawah bukaan baru di pot dan kebun percobaan (KP). Bandar Buat musim tanam (MT) 1985/86

Perlakuan	Hasil	
	Pot	Lapang
	g pot ¹	t ha ⁻¹
Tergenang terus-menerus	33,41	2,32
Pengeringan 1 minggu, interval 1 minggu	25,63	3,40
Pengeringan 1 minggu, interval 2 minggu	45,35	3,28
Pengeringan 1 minggu, interval 1 minggu ¹	34,00	3,50
Pengeringan 1 minggu, interval 1 minggu ²	45,86	3,28
Pengeringan 1 minggu, interval 2 minggu ¹	42,21	3,33
Pengeringan 1 minggu, interval 2 minggu ²	45,83	3,37

Keterangan: ¹pada fase vegetatif, ²pada fase generatif
 Sumber: Zaini *et al.* (1987) dan Balittan Sukarami (1986)

Tabel 4. Pengaruh drainase terputus terhadap kadar hara padi sawah bukaan baru di kebun percobaan (KP) Bandar Buat, musim tanam (MK) 1986

Perlakuan	Kadar hara tanaman				
	P	K	Ca	Mg	Fe
	%				ppm
Tergenang terus-menerus	0,08	0,78	0,24	0,20	387
Pengeringan 1 minggu, interval 1 minggu	0,10	0,80	0,33	0,23	229
Pengeringan 1 minggu, interval 2 minggu	0,09	0,86	0,34	0,23	265
Pengeringan 1 minggu, interval 1 minggu ¹	0,09	0,80	0,29	0,22	288
Pengeringan 1 minggu, interval 1 minggu ²	0,10	0,98	0,37	0,26	140
Pengeringan 1 minggu, interval 2 minggu ¹	0,09	0,78	0,25	0,22	293
Pengeringan 1 minggu, interval 2 minggu ²	0,12	0,93	0,40	0,24	167

Keterangan: ¹pada fase vegetatif, ²pada fase generatif.
 Sumber: Zaini *et al.* (1987)

Pengeringan selama 6 dan 9 hari pada 30 hari setelah tanam dapat meningkatkan hasil sebesar dua dan tiga kali lipat dibandingkan tanpa pengeringan. Pencucian lahan dapat mengurangi pengaruh keracunan besi. Pada tanah Podsolik di Setianegara dan Banjit, Lampung Tengah serta Sitiung I, Sumbar, menunjukkan pencucian dapat meningkatkan hasil padi 5, 9 dan 2 kali dibandingkan tanpa pencucian dan tanpa pemupukan, hal ini disebabkan bahwa pencucian dapat menurunkan kelarutan besi fero dan memperbaiki aerasi tanah, sehingga ketersediaan beberapa unsur hara meningkat dan perkembangan perakaran menjadi lebih baik, namun demikian pencucian juga akan mencuci beberapa unsur hara yang dibutuhkan tanaman (Tabel 5).

Tabel 5. Pengaruh pencucian lahan terhadap produksi gabah pada tanah Podsolik Setianegara dan Banjit, Lampung Tengah serta Sitiung 1, Sumbar

Perlakuan	Berat kering gabah							
	Setianegara ¹⁾			Banjit ¹⁾			Sitiung ²⁾	
	0	NPK	Rataan	0	NPK	Rataan	0	NPK
	g/pot							
Tanpa pencucian	0,6	24,5	13,5	0,4	21,9	10,3	1,3	-
Dengan pencucian	2,9	20,1	13,6	3,4	23,0	15,7	2,2	69,2

Keterangan: rata-rata = rata-rata dari beberapa perlakuan.

Sumber: ¹⁾Adiningsih dan Sudjadi (1983); ²⁾Taher dan Misran (1983)

Berdasarkan Tabel 5, pada perlakuan pemupukan NPK, pengaruh pencucian tidak menunjukkan pengaruh yang berbeda pada lokasi Setianegara dibandingkan Banjit, hal ini disebabkan rendahnya kadar besi fero yang terlarut yaitu sebesar 24 ppm setelah 5 minggu penggenangan dan kadar K yang tinggi. Menurut Tanaka dan Tadano (1972) keracunan besi pada padi sawah berhubungan erat dengan kalium, semakin tinggi kadar K tanaman, semakin baik pertumbuhan tanaman.

Hasil percobaan di rumah kaca menunjukkan bahwa penggenangan kontinyu dan terputus tidak berpengaruh nyata terhadap nilai pH dan potensial redoks, pertumbuhan dan hasil tanaman padi pada tanah dari Indramayu dan Lampung (Hartatik *et al.*, 1997). Demikian juga Kasno *et al.* (1999) dan Nursyamsi *et al.* (1996) melaporkan pengairan secara terputus cenderung menurunkan hasil padi, hal ini diduga pengairan terputus justru meningkatkan besi amorf sehingga meracuni tanaman.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama penggenangan, pH tanah meningkat dan Eh menurun. Setiap penurunan Eh sebesar 282 mV meningkatkan satu unit pH. Pemupukan fosfat alam meningkatkan pH tanah, sedangkan pengairan terputus menurunkan pH. Penurunan Eh meningkatkan kadar Fe tersedia dalam tanah dan kadar Fe dalam tanaman (Kasno *et al.*, 1999).

Ameliorasi dan pemupukan

Ameliorasi pada sawah bukaan baru dengan pemberian kapur dan bahan organik seperti pupuk kandang dapat meningkatkan hasil padi dan menurunkan keracunan besi. Pemberian kapur 1 t dan pupuk kandang 5 t ha⁻¹ serta pemupukan NPK meningkatkan hasil padi 1-2 t dibandingkan kontrol (Tabel 6).

Tabel 6. Pengaruh pemupukan NPK, kapur dan pupuk kandang terhadap hasil padi di lahan sawah bukaan baru, Bangkinang, Riau

Perlakuan	Berat kering gabah			
	Uwai ¹⁾	Air Tiris ²⁾	Air Tiris ³⁾	Air Tiris ⁴⁾
	t ha ⁻¹			
Kontrol	1,68	3,03	3,04	3,03
NPK	3,23	3,95	4,90	4,79
NPK + 1 t CaCO ₃ ha ⁻¹	4,10	4,91	5,80	5,84
NPK + 5 t pupuk kandang ha ⁻¹	3,93	4,92	5,40	5,54

Keterangan: ¹⁾ Pemupukan 45 kg N dan P₂O₅ serta 60 kg K₂O ha⁻¹, ²⁾ Rata-rata dari pemupukan 1/2 dan optimal (90 kg N dan P₂O₅ serta 60 kg K₂O ha⁻¹), ³⁾ Rata-rata dari beberapa varietas dengan pemupukan 90 kg N dan P₂O₅ serta 60 kg K₂O/ha ⁴⁾ Pemupukan 90 kg N, 45 kg P₂O₅, dan 45 kg K₂O ha⁻¹.

Sumber: Jalid dan Hirwan (1987); Burbey dan Yusril (1989).

Ameliorasi pada lahan sawah bukaan baru Harapan Masa Tapin, Kalsel menunjukkan bahwa pemberian kapur meningkatkan hasil gabah kering walaupun tidak berbeda nyata dibandingkan dolomit, kapur super fosfat dan kaptan fosfat (Tabel 7). Takaran 500 kg ha⁻¹ meningkatkan hasil gabah kering, tetapi peningkatan takaran dari 500-1.500 kg ha⁻¹ tidak meningkatkan hasil gabah secara nyata (Widowati *et al.*, 1999). Pada tanah Oxisol kebutuhan kapur cukup tinggi karena kadar besi dan Al tinggi maka dibutuhkan kaptan atau dolomit >2 t ha⁻¹, sehingga takaran dibawah angka itu tidak akan berpengaruh nyata.

Ismunadji dan Sabe (1988) melaporkan bahwa pemupukan P dan K pada tanah Ultisol. Lampung yang mengalami keracunan besi dan kahat hara meningkatkan hasil empat kali lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian N saja.

Pemupukan N, P dan K pada tanah Ultisol, di Air Tiris, Bangkinang, Riau yang kahat hara dan keracunan besi meningkatkan hasil padi 1,6 t ha⁻¹ dibanding pemupukan N saja. Bila diikuti pemupukan Cu dan Zn dapat meningkatkan hasil padi dua kali lipat dibanding pemupukan N dan P saja di Uwai (Tabel 8).

Tabel 7. Pengaruh bahan amelioran terhadap hasil gabah kering (t ha⁻¹) di lahan sawah bukaan baru Oxisol di Harapan Masa-Tapin Kalsel

Perlakuan Jenis amelioran	Takaran amelioran								Rataan	
	0		500		1000		1500		MH 97/98	MK 98
	MH 97/98	MK 98	MH 97/98	MK 98	MH 97/98	MK 98	MH 97/98	MK 98		
Kaptan	3,88	3,47	3,94	3,73	4,17	3,55	4,54	3,52	4,13	3,57 A
Dolomit	3,59	2,71	4,06	3,47	4,67	3,57	4,51	3,84	4,21	3,39 A
KSP	4,24	3,03	4,38	3,59	4,68	3,27	4,91	3,30	4,56	3,29 A
Kapur- fosfatan	3,35	3,05	3,58	3,52	4,04	3,57	4,56	3,54	3,88	3,42 A
Rataan	3,77	3,06 a	3,99	3,58 b	4,39	3,48 b	4,63	3,55 b	4,19	3,42

Sumber: Widowati *et al.* (1999)

Tabel 8. Pengaruh pemupukan terhadap hasil gabah padi pada lahan sawah bukaan baru tanah mineral masam Ultisol di Bangkinang, Riau

Perlakuan	Bobot kering gabah	
	Uwai ¹⁾	Air Tiris ²⁾
	t ha ⁻¹	
Tanpa pupuk	1,68	3,03
N	-	3,19
NP	2,21	4,38
NPK	3,23	4,79
NPK + Cu dan Zn	4,28	-

Keterangan: ¹⁾ Pemupukan 45 kg N, P₂O₅, 60 kg K₂O, dan 5 kg Cu dan Zn ha⁻¹.

²⁾ Pemupukan 90 kg N, 45 kg P₂O₅, dan 45 kg K₂O ha⁻¹.

Sumber: ¹⁾ Jalid dan Erwan (1988) dan ²⁾ Burbey dan Yusril (1989)

Hasil penelitian Abbas *et al.* (1990) di sawah bukaan baru Podsolik Merah Kuning (Ultisol) di Sitiung pada MK 1990 menunjukkan bahwa perlakuan dua kali drainase pada waktu pengolahan tanah meningkatkan jumlah anakan dan bobot kering tanaman, masing-masing 32 dan 29% dibandingkan tanpa drainase. Pemberian 5 t pupuk kandang dan 2 t kapur ha⁻¹ dengan sekali drainase cenderung meningkatkan jumlah anakan dan bobot kering tanaman dibandingkan tanpa drainase, hal ini menunjukkan drainase cukup efektif dalam pengelolaan sawah bukaan baru (Tabel 9).

Tabel 9. Pengaruh pemupukan dan ameliorasi kaptan dan pupuk kandang terhadap rata-rata jumlah anakan dan berat kering tanaman pada tanah Ultisol di Sitiung MK 1990

Perlakuan	Jumlah anakan	Berat kering/m ²
	batang	gr
1. NPK	20,7 b*	291 c
2. Pukan + kapur + NPK	22,3 ab	304 bc
3. Drainase 2 kali + NPK	27,5 a	374 a
4. Drainase 1 kali + pukan + kapur + NPK	25,8 ab	341 ab

* Angka-angka pada kolom yang sama tidak diikuti huruf kecil yang sama, berbeda nyata pada taraf 5% menurut DNMR. Sumber: Abbas *et al.*, 1990

Lebih lanjut Abbas menunjukkan bahwa serapan Fe²⁺ dan Mn²⁺ tanaman padi umur 80 hari meningkat akibat perlakuan ameliorasi, pemupukan dan drainase dua kali (Tabel 10).

Tabel 10. Analisis serapan hara tanaman umur 80 hari pada tanah Ultisol di Sitiung MK 1990

Perlakuan	N	P	K	Fe	Mn
	%			-- ppm --	
1. NPK	0,68	0,39	2,24	137	3130
2. Pukan + kapur + NPK	1,26	0,39	2,52	250	3592
3. Drainase 2 kali + NPK	0,94	0,40	2,44	420	2868
4. Drainase 1 kali + pukan + kapur + NPK	1,23	0,38	2,38	175	3470

Patrick dan Mahapatra (1968) mengemukakan bahwa konsentrasi Fe yang tinggi dapat menggantikan NH_4^+ dari kompleks pertukaran dalam larutan tanah. Tingginya serapan kedua hara tersebut karena meningkatnya ketersediaan Fe dan Mn dalam tanah. Menurut Sanchez (1976) ketersediaan Mn^{+2} dan Fe^{2+} terjadi pada bulan pertama penggenangan. Kandungan Mn^{+2} diperkirakan mencapai 3.000 ppm pada waktu 40-50 hari penggenangan, sedangkan Fe^{2+} puncak ketersediaannya pada beberapa minggu setelah penggenangan.

Hasil analisis tanah setelah perlakuan menunjukkan bahwa pemberian pukan dan kapur meningkatkan pH tanah dan P-tersedia serta drainase menurunkan Fe tanah (Tabel 11) (Abbas *et al.*, 1990).

Tabel 11. Hasil analisis tanah setelah diberi perlakuan pada tanah Ultisol di Sitiung MK 1990

Perlakuan	pH	P Bray II	K	Fe
		ppm	Me/100 g	ppm
NPK	5,09	14,00	0,23	686
Pukan + kapur +NPK	5,13	39,37	0,25	962
Pukan + kapur + NPK + drainase 1 kali	5,22	27,01	0,24	617

Sumber: Abbas *et al.*, 1990

Tanggap tanaman padi terhadap pemupukan P dan K serta keterkaitan dengan besi terlarut dan sifat-sifat kimia tanah sawah bukaan baru, Sungkai Selatan, Lampung Utara telah diteliti di laboratorium dan rumah kaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan antara ketersediaan P dan K-dd terhadap Fe_2O_3 juga antara ketersediaan P terhadap Al-dd. Jumlah anakan produktif dan bobot gabah bernas berkorelasi negatif nyata terhadap nisbah Fe/P dan Fe/Ca. Batas kritis Fe/P dan Ca/P larutan tanah berturut-turut 50 dan 30 pada saat tanaman berumur 100 hari. Jumlah anakan produktif dan bobot gabah bernas tidak berkorelasi dengan nisbah Fe/K. Meskipun terjadi

peningkatan aktivitas Fe dengan adanya peningkatan nisbah Fe/K, tetapi bahaya keracunan besi tidak berpengaruh terhadap bobot gabah bernas (Al-Jabri *et al.*, 1996). Penelitian serupa dilakukan di sawah bukaan baru Ultisol Tugumulyo, Sumsel. Hasilnya menunjukkan bahwa tanaman padi harus dipupuk P untuk meningkatkan pertumbuhan dan hasil padi sawah. Pemupukan 200 ppm P dan 100 ppm K nyata meningkatkan bobot gabah kering. Semakin tinggi takaran pupuk P semakin tinggi serapan hara tanaman. Jumlah anakan produktif dengan nisbah Fe/P, Fe/Ca, Fe/Mg dan Fe/Ca+Mg tidak berkorelasi (Hartatik dan Al-Jabri, 2000).

Kasno *et al.* (1997) melaporkan bahwa pada lahan sawah yang baru dibuka 2 tahun yaitu di lokasi Dorowati, Lampung, tanaman padi sangat tanggap terhadap pemupukan P, dengan takaran optimum adalah 45 kg P_2O_5 ha⁻¹, sedangkan pada lahan sawah yang dibuka 5 tahun yang lalu di Bandar Abung, Lampung, tanaman padi tidak tanggap terhadap pemupukan P. Hal ini diduga pemupukan P pada tanaman padi di daerah ini telah intensif dilakukan sehingga meningkatkan kadar P tanah. Sejalan dengan hasil penelitian tersebut di atas, pada sawah bukaan baru dari Harapan Masa Tapin, Kalsel, menunjukkan tanggap tanaman padi terhadap pemupukan P baik berupa SP-36 maupun fosfat alam dengan takaran P optimum 180 kg P_2O_5 ha⁻¹ (Widowati *et al.*, 1999).

Penelitian rumah kaca pada lahan sawah bukaan baru dari Lampung menunjukkan bahwa tanaman padi IR-64 tanggap terhadap pemupukan NPK. Pemupukan 200 ppm N, 100 ppm K dan 150 ppm P disertai pemberian Zn dengan perlakuan penggenangan terputus nyata meningkatkan hasil padi (Hartatik *et al.*, 1997).

Pada lahan sawah bukaan baru Inceptisol di Muarabeliti dan Ultisol di Tatakarya, pemberian jerami 5 t ha⁻¹ meningkatkan C-organik, K-dd, K-HCl dan KTK tanah, serapan K tanaman, hasil jerami dan gabah kering. Pemberian pupuk KCl 150 kg ha⁻¹ disertai dolomit 50 kg ha⁻¹ pada Inceptisol Muarabeliti meningkatkan kadar K-HCl dan K-dd tanah serta hasil gabah kering (Nursyamsi *et al.*, 2000).

Kasno *et al.* (1999) melaporkan pengaruh pemupukan dan pengairan terhadap Eh, pH, ketersediaan P dan Fe, serta hasil padi pada tanah sawah bukaan baru Ultisol Tugumulyo Sumsel. Tanaman padi sangat tanggap terhadap pemupukan P, untuk mencapai hasil padi maksimum dibutuhkan pemupukan 388 kg SP-36 dan 5 t jerami ha⁻¹.

Hasil penelitian rumah kaca menggunakan tanah sawah bukaan baru Ultisol dari Tatakarya Lampung menunjukkan bahwa hara N, P dan K merupakan pembatas pertumbuhan tanaman, sedangkan pada Inceptisol di Muarabeliti kahat hara N, P, K dan S. Pemberian pupuk N dan P disertai pupuk kandang dan jerami padi nyata meningkatkan pertumbuhan tanaman padi (Nursyamsi *et al.*, 1996). Rendahnya kalium pada sawah bukaan baru akan mempengaruhi ketahanan tanaman terhadap penyakit, sehingga tanaman padi mudah terserang bercak coklat.

Pengujian efektivitas fosfat alam pada lahan sawah bukaan baru menunjukkan bahwa pemupukan P baik fosfat alam (North Carolina, Ciamis, dan *Chrismas*) maupun SP-36 meningkatkan ketersediaan hara P dalam tanah dan tanaman di Dorowati Lampung, namun tidak mampu meningkatkan pH, Ca dan tidak menurunkan kandungan Al dan Fe. Pemupukan fosfat alam memberikan efektivitas yang sama dengan SP-36 (Kasno *et al.*, 1997). Pemberian fosfat alam yang mempunyai reaktivitas tinggi, pupuk kandang dan pencucian besi dapat meningkatkan produktivitas tanah Ultisol di Air Gegas, Sumsel, yang baru disawahkan. Pemberian fosfat alam dua minggu sebelum penggenangan meningkatkan P-tersedia tanah enam kali lebih tinggi dibandingkan SP-36. Pemberian pupuk kandang 20 t ha⁻¹ yang diberikan pada saat penggenangan meningkatkan P-tersedia lebih tinggi dibandingkan jerami, peningkatan P terjadi melalui ikatan kompleks dengan besi, sehingga mengurangi aktivitas besi dalam menjerap P. Perlakuan pupuk kandang dan pencucian besi meningkatkan efektivitas fosfat alam. Selanjutnya tanggap tanaman padi terhadap kombinasi perlakuan fosfat alam dan pencucian serta residunya lebih baik dibandingkan kombinasi fosfat alam dan pupuk kandang (Hanum, 2004).

Penelitian peningkatan produktivitas lahan sawah bukaan baru Ultisol, Bangun Rejo, Lampung menunjukkan bahwa kendala utama peningkatan produktivitas yaitu rendahnya bahan organik, kawat Ca, Mg dan S. Oleh karena itu sangat disarankan pemberian bahan organik baik dengan pengembalian jerami atau pupuk kandang serta pemupukan. Pemberian pupuk kandang meningkatkan hasil gabah kering 22,5% yaitu sebesar 5,7 t ha⁻¹. Hasil ini sejalan dengan penelitian penjajagan hara di rumah kaca pada lahan sawah yang sama menunjukkan bahwa tanaman padi tanggap terhadap unsur hara P, K, Mg, Zn serta bahan organik (pupuk kandang) (Suriadikarta *et al.*, 2003). Penelitian serupa pada lahan sawah bukaan baru dari Kandangan Kalsel menunjukkan bahwa tanaman padi memerlukan pemupukan N, P, K dan Zn (Widowati *et al.*, 1999).

Perbaikan sifat fisik

Selain usaha perbaikan kesuburan tanah, sifat fisik pada sawah bukaan baru juga yang perlu diperhatikan adalah laju infiltrasi. Di lapangan laju infiltrasi bervariasi antara agak lambat sampai sangat cepat tergantung jenis tanahnya. Tanah-tanah yang tergolong tua seperti Oxisol dan Ultisol tergolong porus, dan juga pada tanah berpasir tinggi seperti di Lambunu Sulawesi Selatan. Menurut Suharta dan Sukardi (1994), kehilangan air rata-rata pada sebagian besar tanah mineral tergolong tinggi yaitu sebesar 0,9 l detik⁻¹ ha⁻¹. Namun dengan cara dua kali dicangkul dan dua kali dilumpurkan mampu mengurangi laju infiltrasi hingga >90%.

Perbaikan varietas tanaman

Pengendalian keracunan besi juga dapat melalui perbaikan varietas tanaman. Varietas IR-42 merupakan varietas yang cukup toleran terhadap keracunan besi, dianjurkan pada daerah yang tidak terserang hama wereng. Uji daya hasil lanjutan galur/varietas yang toleran terhadap keracunan besi menunjukkan bahwa beberapa varietas cukup potensial dikembangkan pada lahan sawah yang keracunan besi, yaitu varietas Tondano, Klara dan Batang Ombilin, galur B 5584c-4-st-4-14-32 dan B 5848-5-Sr-104 (Tabel 12 dan Tabel 13).

Tabel 12. Uji daya hasil lanjutan padi sawah bukaan baru di Sitiung, musim hujan (MH) 1986/1987

Galur/varietas	Hasil
	t ha ⁻¹
B 5848d-5-Sr-104	4,80
B 5592c-7-st-3-5-48	3,34
B 5828d-19-sr-37	3,09
RP 1899-1689-48	2,82
IR 388-10	2,75
IR 5785-188-2-1	2,70
B 5569c-5-st-78-2-1d	2,61
GH 324	2,61
BR 51-4b-5	2,48
IR 5741-73-2-3	2,26
B-58-4c-106-2	2,25
Batang ombilin ¹⁾	2,24

Keterangan: ¹⁾Kontrol

Sumber: Burbey *et al.* (1989).

Penggunaan varietas yang tahan merupakan cara pengendalian keracunan besi yang baik dan ekonomis, oleh karena itu dibutuhkan beberapa varietas padi yang tahan, namun demikian diperlukan waktu yang agak lama.

Tabel 13. Uji daya hasil lanjutan varietas yang tahan keracunan besi, Bangkinang Riau, MH 1987/88

Galur/varietas	Hasil
	t ha ⁻¹
Tondano	4,11
B 5584-4-st-4-14-32	4,02
B 3913f-16-20-st-12-14	3,96
Klara	3,83
IR-64	3,62
Danau bawah	3,23
Batang ombilin ¹⁾	3,78

Keterangan: ¹⁾Kontrol

Sumber: Jalid dan Hirwan (1987).

Pemupukan empat varietas padi di sawah bukaan baru dataran Lalundu, Kecamatan Dolo, Kabupaten Donggala menunjukkan bahwa hasil yang berbeda-beda walaupun diberikan takaran pupuk yang sama yaitu: Urea 200 kg ha⁻¹, SP-36 100 kg ha⁻¹, dan KCl 100 kg ha⁻¹. Hasil tertinggi diperoleh pada varietas Cisanggarung sebesar 6,5 t ha⁻¹ (Tabel 14).

Tabel 14. Produksi rata-rata beberapa varietas padi di dataran Lalundu Kecamatan Dolo, Kabupaten Donggala MT 2000

No	Nama varietas	Hasil GK t ha ⁻¹
1.	Kapuas	5,1
2.	Lematang	4,7
3.	Lalan	3,5
4.	Cisanggarung	6,5

PENUTUP

Peluang pengembangan lahan sawah ke luar Pulau Jawa cukup tinggi, karena potensi sumber daya lahan yang ada saat ini masih besar, walaupun kendala-kendala sawah bukaan baru cukup besar. Penerapan pengelolaan hara terpadu dengan penggunaan pupuk anorganik dan organik serta pupuk hayati merupakan jawaban teknologi untuk meningkatkan produktivitas lahan sawah mineral masam bukaan baru. Takaran pupuk yang digunakan dapat berdasarkan kepada hasil uji tanah spesifik lokasi.

Adanya sawah bukaan baru diluar Jawa diharapkan dapat menyediakan lapangan kerja bagi masyarakat di desa. Dengan dibukanya lahan kering menjadi lahan sawah, maka lahan sawah dapat berperan multifungsi. Fungsi-fungsi itu adalah: pengendali banjir, pencegah erosi, penyedia sumber daya air, dan pendaur ulang sampah bahan organik. Sehingga dapat dikatakan bahwa sistem sawah menjadi pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Pada umumnya pembukaan lahan sawah bukaan baru menggunakan tanah mineral masam yang berbahan induk tufa masam yang miskin akan unsur hara dan mengandung besi tinggi yang bisa berpotensi memicu keracunan besi bagi tanaman padi. Untuk meningkatkan lahan sawah bukaan baru diperlukan masukan tinggi, seperti: pupuk, bahan ameliorasi (kaptan/dolomit), pupuk hayati, dan pupuk kandang, serta kompos jerami. Sehingga petani memerlukan modal kerja yang cukup besar. Untuk mengatasi itu mestinya pemerintah dapat menyediakan kredit usaha tani yang dapat dilunasi pada saat panen.

Selain modal kerja untuk meningkatkan produktivitas lahan diperlukan

adanya sarana irigasi untuk menyediakan air secara penuh pada saat musim tanam berlangsung. Pemerintah perlu mengeluarkan dana cukup besar dalam pembangunan jaringan irigasi.

Petani tidak mudah untuk menerima teknologi anjuran, tetapi secara bertahap teknologi itu akan diterima dan dipertimbangkan jika *output* yang dihasilkan dapat meningkatkan pendapatannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, H., E. Mawardi dan A. Taher. 1990. Dampak pemeliharaan Ikan dan ameliorasi pada lahan sawah bukaan baru. hlm. *dalam* Prosiding Pengelolaan Sawah Bukaan Baru Menunjang Swasembada Pangan dan Program Transmigrasi. Padang, 17-18 September 1990.
- Adiningsih, J. S. dan M. Sudjadi. 1983. Pengaruh penggenangan dan pemupukan terhadap tanah Podsolik Lampung Tengah. Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk 2: 1-7.
- _____, dan M. Soekardi. 1994. Potensi Sumberdaya Lahan Untuk Pencetakan Sawah Irigasi Di Lokasi PIADP Sumatera. Risalah Hasil Penelitian Potensi Sumberdaya Lahan Untuk Pengembangan Sawah Irigasi di Sumatera.
- _____, Sulaeman, dan Mulyadi. 1999. Pengaruh pemupukan dan pengairan terhadap Eh, pH, ketersediaan P dan Fe, serta hasil padi pada tanah sawah bukaan baru. Hal: 72-81. Jurnal. tanah dan iklim. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Breemen, Van and F. R. Moorman. 1978. Iron-toxic soils. *In* Soil and Rice. IRRI, Los Banos, Philippines. p 781-797.
- Burbey dan Yusrial, 1989. Pemupukan NPK, kapur, dan hara mikro serta bahan organik pada padi sawah keracunan besi. Laporan hasil penelitian Balittan Sukarami, MT 1988/89.
- Burbey dan Yusrial. 1989. Pemupukan N, P, K, kapur dan hara mikro serta bahan organik pada padi sawah keracunan besi. Laporan Hasil Penelitian Balittan Sukarami, MT 1988/1989.
- De Datta, S.K. 1981. Principles and practices of rice production. The International Rice Research Institute Los Banos. The Philippines. John Wiley & Sons 618 p.
- Hanum, H. 2004. Peningkatan produktivitas tanah Ultisol yang baru disawahkan berkaitan dengan P tersedia melalui pemberian bahan organik, fosfat alam dan pencucian besi. Disertasi. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor.

- Hartatik, W, L. Retno Widowati dan Sulaeman. 1997. Pengaruh potensial redoks terhadap ketersediaan hara pada tanaman padi sawah. Hal: 19-33. Proseding Pertemuan. Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Hal: 1-18. Cisarua, Bogor 4-6 Maret 1997.
- Jalid, N., and Hirwan. 1987. Pengaruh pemupukan NPK, kapur, bahan organik dan hara mikro terhadap padi sawah bukaan baru. Laporan hasil penelitian tahun 1987/1988.
- _____, Sulaeman, dan Sutisni Dwiningsih. 2000. Penentuan ketersediaan P tanah menggunakan kurva erapan pada sawah bukaan baru. Hal: 23-28. Jurnal tanah dan iklim. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- _____, A. Soepartini dan J. Sri Adiningsih. 1996. Tanggap padi sawah terhadap pemupukan P dan K serta ketersediaan Fe terlarut dengan sifat-sifat kimia tanah sawah bukaan baru. Proseding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Hal: 63-73. Bogor 26-28 September 1995.
- Kasno. A., Sulaeman dan B. Hendro Prasetyo. 1997. Efektivitas penggunaan pupuk P-alam pada lahan sawah bukaan baru. Hal: 39-53. Proseding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Hal: 1-18. Cisarua, Bogor 4-6 Maret 1997.
- Kawaguchi, K and K. Kyuma. 1977. Paddy Soils In Tropical Asia. Their Material Nature And Fertility. Monograph of The Center For Southeast Studies Kyoto University. The University Press of Hawaii. Honolulu, USA.
- _____, dan M. Al-Jabri. 2000. Pengaruh pemupukan P dan K terhadap sifat kimia dan hasil padi sawah bukaan baru Ultisols Tugumulyo Sumatera Selatan. Proseding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan Cisarua, Bogor 9-11 Pebruari 1999. Hal: 201-213. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Nursyamsi, D., D. Setyorini dan J. Sri Adiningsih. 1996. Pengelolaan hara dan pengaturan drainase untuk menanggulangi kendala produktivitas sawah baru. Hal: 113-127. Proseding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Hal: 1-18. Cisarua, Bogor 4-6 Maret 1997.
- Ottow, J. C. G., G. Benckiser, and I. Watanabe. 1982. Iron J toxicity of rice as a multiple nutritional soil stres. Trop. Agric. Res. Ser. No. 15.
- Patrick, W. H dan I. C. Mahapatra. 1968. Transformations and availability to rice of nitrogen and phosphorus in water logged soils, Adv. Agron 20 : 323 - 359.
- Ponnamperuma, F. M. 1972. The chemistry of submerged V/soils. IRRI. Los Banos, Philippines. p.51-55.

- Ponnamperuna, F.M. 1996. Specific Soil Chemical Characteristic for Rice Production in Asia. IRRI Research Paper Series Nanta. Phillipines.
- Ponnamperuna, F.M. 1997. The Chemistry of Submerged Soils. Adv. Arpen. On: 29-96.
- Puslittanak. 1993. Survei dan Penelitian Tanah Merowi I. Kalimantan Barat. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (Tidak dipublikasikan).
- _____, L.R. Widowati., D. Setyorini dan J. Sri Adiningsih. 2000. Pengaruh pengelolaan tanah, pengairan terpadu dan pemupukan terhadap produktivitas lahan sawah baru pada Inceptisols dan Ultisols. Muara Beliti dan Tatakarya. Hal: 29-38. Jurnal tanah dan iklim. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- _____, 1998. Erapan fosfat, kelarutan hara makro dan mikro serta penguasaan besi terhadap padi sawah. Tesis Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Sanchez, P.A. 1976. Properties and management of soil in the tropical. John Willey and Sons. p 421-470.
- Suharta, N dan M. Soekardi. 1994. Potensi Sumberdaya Lahan Untuk Pencetakan Sawah Irigasi Di Lokasi PIADP Kalimantan dan Sulawesi. Risalah Hasil Penelitian Potensi Sumberdaya Lahan Untuk Pengembangan Sawah Irigasi di Kalimantan dan Sulawesi.
- Sulaeman, Eviati, dan J. Sri Adiningsih. 1997. Pengaruh Eh dan pH terhadap sifat erapan fosfat, kelarutan besi dan hara lain pada tanah Hapludox Lampung. Proseding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan. Agroklimat. Hal: 1-18. Cisarua, Bogor 4-6 Maret 1997.
- Suriadikarta, D.A, W. Hartatik dan G. Syamsidi. 2003. Penelitian peningkatan produktivitas lahan sawah di luar Jawa untuk mendukung ketahanan pangan. Laporan Akhir Balai Penelitian Tanah.
- _____, dan S. Roechan. 1988. Hara Mineral Tanaman Padi *dalam* Ismunadji. M., S. Partohardjom, M. Syam, A. Widjono. 1988. Padi. Badan Penelitian Tanaman Pangan, 231-270.
- _____, dan W. Sabe. 1988. Pengaruh fosfat dan hara lain terhadap keracunan besi pada padi sawah. Balai Penelitian Tanaman Pangan Bogor.
- Taher, A, dan Misran, 1984. Pengendalian keracunan Besi V/pada sawah bukaan baru. Pemberitaan Penelitian Sukarami, No. 4, hal 3-6.
- Tanaka, A. and S.Yoshida. 1970. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. Tech. Bul. 10. The International Rice Research Institute, Los Banos, Phillipines.

-
- Tanaka, A. and T. Tadano, 1972. Potassium in relation to L/iron toxicity of the rice plant. *Potash Rev.* 21:1-12.
- Van Mensvoort, M.I., R.S. Jantin, R. Brinkman and M. Van Breemen. 1985. Tasisities of Wetland Soil. In *Wetland Soil: Characterization, Classification and Utilization*. The International Rice Research Institute Los Banos Jaguna, Phillippines. p. 123-138.
- Widowati, L.R. S. Rochayati, S. Abdullah dan J. Sri Adiningsih. 1999. Pengaruh unsur hara Ca, Mg, S dan hara mikro terhadap produktivitas lahan sawah bukaan baru. Laporan Akhir Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Widowati, L.R., D. Nursyamsi, dan J. Sri Adiningsih. 1979. Perubahan sifat kimia tanah dan pertumbuhan padi pada lahan sawah bukaan baru di rumah kaca. *Jurnal Tanah dan Iklim.* 50-60. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Yusuf, A., S. Djakamihardja, G. Satari dan S. Djakasutami. 1990. Pengaruh pH dan Eh terhadap kelarutan, Fe, Al dan Mn pada lahan sawah bukaan baru jenis Oxisol Sitiung. hlm. dalam *Prosiding Pengelolaan Sawah Bukaan Baru Menunjang Swasembada Pangan dan Program Tranmigrasi*. Padang, 17-18 September 1990. Fakultas Pertanian Universitas Ekasaksi dan Balai Penelitian Tanaman Pangan, Sukarami.
- Zaini, Z., Burbey, N. Jalid, dan A. Kaheer. 1987. Teknologi pengendalian keracunan besi pada sawah bukaan baru. Dalam *Risalah Ahli Teknologi*. Balittan Sukarami 14-15 September 1987. Hal 16-21.

5. TEKNOLOGI PENGELOLAAN HARA LAHAN SAWAH INTENSIFIKASI

Diah Setyorini, Ladiyani Retno Widowati, dan Sri Rochayati

Penerapan teknologi revolusi hijau pada tanaman padi varietas unggul baru telah menempatkan pupuk anorganik sebagai faktor produksi penting dalam peningkatan produksi padi Indonesia. Selama periode 1969-1997, pemerintah telah menerapkan serangkaian kebijakan untuk mendorong penggunaan pupuk pada usaha tani padi, baik dari sisi penyediaan maupun dari sisi kemampuan petani dalam mengakses pupuk. Namun demikian, terjadinya pelandaian produktivitas padi sejak tahun 1985 serta meningkatnya harga pupuk akibat penghapusan subsidi pupuk, merupakan momentum penting untuk lebih meningkatkan efisiensi sistem usaha tani terutama penggunaan pupuk pada padi sawah yang merupakan konsumen pupuk terbesar.

Indonesia merupakan salah satu negara pengonsumsi beras terbesar di dunia. Penduduk tersebar 59% di Pulau Jawa, dan sisanya 41% di pulau-pulau lainnya (BPS, 2000). Sebaran penduduk ini berkorelasi positif dengan sebaran areal persawahan. Hampir 42% lahan sawah ada di Pulau Jawa, 27% di Sumatera, sedangkan 13, 11, dan 7% berturut-turut ada di Kalimantan, Sulawesi, dan Bali-Nusa Tenggara Barat dan Timur. Terkonsentrasinya lahan persawahan di Pulau Jawa berkaitan dengan jenis tanah yang berasal bahan induk endapan vulkan, dimana secara alami lebih subur daripada tanah-tanah sawah yang berasal dari bahan induk endapan tersier. Tingkat kesuburan tanah alami yang relatif lebih baik dan ditunjang oleh adopsi teknologi budi daya yang lebih maju, mengakibatkan terjadinya kesenjangan produktivitas yang tinggi antara lahan sawah di Jawa dan di luar Pulau Jawa. Hasil kajian oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat (Puslitbangtanak) menunjukkan bahwa produktivitas lahan-lahan sawah di Jawa telah mengalami "*leveling off*", untuk memperoleh tingkat produktivitas padi yang sama diperlukan *input* lebih banyak atau penambahan *input* yang banyak tidak diimbangi dengan penambahan hasil padi secara proporsional.

Upaya peningkatan produktivitas lahan di luar Pulau Jawa masih berpeluang yang cukup tinggi jika teknologi pertanian yang sudah ada diaplikasikan dengan tepat. Selain itu perluasan areal tanam melalui pembukaan lahan sawah irigasi baru dan peningkatan intensitas tanam akan memberi sumbangan besar terhadap pertumbuhan produksi padi di masa depan. Untuk memperbaiki produktivitas tanah pertanian, meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan pendapatan petani, diperlukan terobosan teknologi yang ramah lingkungan melalui sistem pengelolaan hara terpadu (*integrated plant nutrient management system - IPNMS*) dengan menerapkan pemupukan berimbang berdasarkan uji tanah dipadukan dengan

pupuk organik dan pupuk hayati.

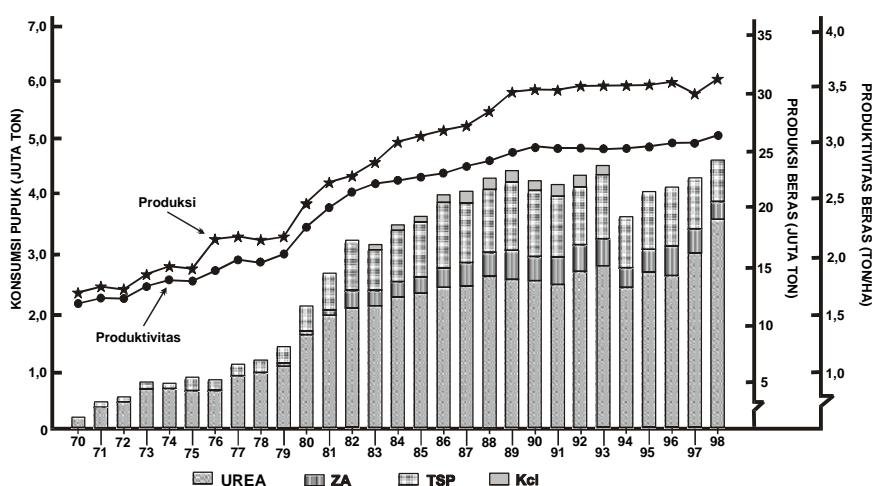
PERKEMBANGAN PENGGUNAAN PUPUK DAN PRODUKTIVITAS PADI SAWAH

Upaya peningkatan produksi beras telah dirintis sejak pertengahan tahun 1950 melalui program Swa Sembada Bahan Makanan (SSBM). Pada akhir tahun 1950-an dilancarkan program padi sentra untuk mengintensifkan usaha peningkatan produksi melalui penanaman varietas unggul, perbaikan cara bercocok tanam, perbaikan pengelolaan air, pemupukan tepat dan pemberantasan hama dan penyakit yang dikenal dengan teknologi revolusi hijau. Pada akhir 1960-an diperkenalkan terobosan teknologi varietas padi unggul berproduksi tinggi, berumur genjah dan responsif terhadap pupuk anorganik seperti PB-5 dan PB-8 (Puslitbangtan).

Melalui berbagai program intensifikasi padi seperti Bimas (bimbingan masal), Insus (intensifikasi khusus), Inmas, Inmun, Opsus (operasi khusus) dan Supra Insus dapat diproduksi beras sejumlah 12,2 juta ton pada tahun 1969 dan meningkat tajam menjadi 25 juta ton pada tahun 1985, dengan laju peningkatan rata-rata sebesar 6,9% tahun⁻¹. Produktivitas padi pada tahun 1970, 1980, 1990 dan 2000 berturut-turut sebesar 2,65; 3,58; 4,47; dan 4,63 t ha⁻¹ (BPS, berbagai tahun). Rata-rata produktivitas padi sawah irigasi beragam antar pulau dan antar propinsi, tertinggi antara 5,0-5,5 t ha⁻¹ tercatat di Jawa dan Bali pada tahun 2000. Namun demikian sejak tercapainya swasembada beras pada 1984, produksi padi nasional sangat fluktuatif dan cenderung terus menurun hingga mencapai 2,7% tahun⁻¹ pada periode 1985-1997 (Fagi dan Kartaatmadja, 2003).

Dalam upaya memacu produksi tanaman pangan terutama beras melalui penganangan program intensifikasi, pupuk mulai dikenal dan banyak digunakan petani padi di Indonesia terutama pupuk urea. Program intensifikasi padi sawah antara lain adalah gabungan antara penggunaan varietas padi unggul dan teknik budi daya padi modern.

Sejak awal Pelita I sampai dengan 1980, peningkatan produksi dan produktivitas beras hampir sejalan dengan peningkatan penggunaan pupuk (Gambar 1). Setelah 1984 laju kenaikan produktivitas mulai melambat, sedangkan laju penggunaan pupuk masih meningkat terus sampai 1989. Hal ini menunjukkan adanya penurunan efisiensi penggunaan pupuk dimana kenaikan produksi per satuan pupuk makin menurun (Adiningsih, 1992).



Gambar 1. Keragaan penggunaan pupuk, produksi, dan produktivitas beras selama 1970 - 1998

Gambar 1. Keragaan penggunaan pupuk, produksi, dan produktivitas tanaman padi, 1978-1998

Harga pupuk sejak tahun 1991 dapat berdampak buruk terhadap produktivitas tanaman, terutama bila hal ini terjadi pada lahan sawah yang kahat P dan K, terlebih apabila pupuk urea diberikan secara berlebihan sehingga pemupukan menjadi tidak berimbang.

Oleh karena itu, untuk mendorong petani padi menggunakan pupuk secara efisien dan berimbang, pemerintah secara bertahap melepas subsidi harga pupuk dan pada tahun 1998 subsidi harga pupuk secara keseluruhan telah dihapus.

Dengan kata lain pasar pupuk telah diliberalisasikan. Sejak tahun 2002, pemerintah telah menerapkan kebijakan rayonisasi distribusi pupuk untuk menjaga ketersediaan pupuk di tingkat petani, khususnya untuk pupuk urea yang paling banyak digunakan oleh petani.

PENGELOLAAN HARA UNTUK PADI SAWAH

Pengelolaan tanaman padi

Tanaman memerlukan 16 unsur hara esensial bagi pertumbuhan tanaman. Tiga diantaranya C, H dan O disuplai dari air dan udara (CO₂), sementara 13 unsur lainnya dikelompokkan atas dua bagian yaitu enam unsur sebagai unsur hara makro dan tujuh unsur sebagai unsur hara mikro. Unsur yang tergolong unsur hara makro adalah nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), belerang (S), sedangkan unsur hara mikro adalah boron (B), mangan (Mn), tembaga (Cu), seng (Zn), besi (Fe), molibdenum (Mo) dan khlor (Cl). Unsur hara makro adalah unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman dalam

jumlah besar sedangkan unsur hara mikro adalah unsur yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah kecil. Sehingga apabila unsur mikro yang diberikan ke dalam tanah melebihi kebutuhan tanaman akan mengakibatkan keracunan tanaman, sebaliknya kalau kekurangan akan menimbulkan kekahatan.

Selain ketersediaan hara, produktivitas tanaman padi ditentukan kesuburan tanah, kondisi iklim (curah hujan dan radiasi surya), varietas tanaman, serta pengendalian hama penyakit tanaman. Dalam kondisi lingkungan biotik dan abiotik yang optimal, tanaman padi dapat tumbuh dan berproduksi secara optimal sesuai dengan potensi hasil atau hasil maksimum untuk varietas tertentu. Namun demikian kondisi ideal seperti ini tidak mudah terpenuhi karena banyaknya faktor penghambat pertumbuhan tanaman padi sawah.

Hasil penelitian Dobermann dan Fairhurst (2000) menyatakan bahwa pada umumnya petani padi di lahan sawah irigasi hanya dapat mencapai produksi <60% dari potensi hasil genetik di suatu tempat dengan kondisi iklim tertentu. Faktor iklim menyumbang variasi hasil sebesar 10% dari hasil maksimum padi varietas unggul di daerah Asia Selatan dan Asia Tenggara. Pada musim kemarau hasil gabah tercatat sekitar 10 t ha⁻¹, sedangkan pada musim hujan sebesar 7-8 t ha⁻¹. Penurunan produksi ini disebabkan pada musim hujan, radiasi matahari lebih rendah dan kelembapan tinggi menyebabkan penyakit tanaman meningkat.

Dobermann dan Fairhurst (2000) menjelaskan bahwa meskipun pengelolaan hara dan pengelolaan tanaman telah dilaksanakan dengan baik, capaian produksi gabah aktual di lahan petani hanya 80% dari potensi hasil padi atau terjadi kehilangan hasil (*yield gap*) sebesar 20%. Pengelolaan hara yang tidak berimbang akan menurunkan hasil padi hingga 40%, dan apabila disertai dengan pengelolaan tanaman yang tidak baik maka kehilangan hasil padi dapat mencapai 60% dari potensinya. Oleh karena itu, faktor pengelolaan hara dan tanaman harus mendapat perhatian yang seimbang.

Agar produksi tanaman padi sawah optimal, teknologi pengelolaan yang direkomendasikan adalah: (1) menggunakan varietas padi unggul sesuai lingkungan setempat; (2) benih padi bermutu (berlabel); (3) pengolahan tanah sempurna; (4) memelihara dan memupuk persemaian; (5) tanam bibit muda (15-21 hari) berdaun empat helai; (6) mengatur jarak tanam secara tepat (tegel atau jajar legowo); (7) pemupukan N dengan bagan warna daun (BWD), pemupukan P dan K berdasar uji tanah; (8) pengairan genangan atau berselang; (9) pengendalian hama dan penyakit terpadu; (10) pengendalian gulma secara tepat; (11) mengembalikan jerami sisa tanaman; dan (12) proses pascapanen yang baik (Balipta, 2004).

Pemupukan berimbang berdasar uji tanah

Untuk pertumbuhannya, tanaman padi memperoleh zat hara yang

bersumber dari dalam tanah atau pupuk yang ditambahkan. Hara di dalam tanah berada dalam keseimbangan yang dinamis antara satu dengan yang lainnya. Oleh karena itu, apabila suatu hara berada dalam kondisi yang berlebih atau kekurangan, maka akan mempengaruhi ketersediaan bagi tanaman. Produktivitas tanaman mengikuti konsep *law of diminishing return*, dimana tingkat produksi tanaman akan optimum pada kondisi hara tertentu. Apabila hara ditambahkan dalam jumlah berlebihan maka hasil tanaman justru menurun. Hukum minimum Liebig's juga menentukan tingkat produksi tanaman, dimana unsur hara yang berada dalam kondisi kurang merupakan pembatas produksi.

Untuk memperbaiki tingkat produksi tanaman dan mempertahankan produktivitas tanah-tanah pertanian, teknologi pengelolaan hara tanaman harus diperbaiki melalui penerapan teknologi ramah lingkungan dengan menerapkan pemupukan berimbang berdasarkan uji tanah dipadukan dengan pupuk organik dan pupuk hayati.

Konsep pemupukan berimbang

Pemupukan berimbang adalah pemberian pupuk ke dalam tanah untuk mencapai status semua hara esensial seimbang sesuai kebutuhan tanaman dan optimum untuk meningkatkan produksi dan mutu hasil, meningkatkan efisiensi pemupukan, kesuburan tanah serta menghindari pencemaran lingkungan. Jenis hara di dalam tanah yang sudah mencapai kadar optimum atau status tinggi, tidak perlu ditambahkan lagi, kecuali sebagai pengganti hara yang terangkut sewaktu panen. Jadi pengertian pemupukan berimbang adalah pemenuhan hara yang berimbang dalam tanah, bukan berimbang dalam bentuk atau jenis pupuk (Anonim, 2003b).

Persamaan untuk pemupukan berimbang mengacu pada persamaan yang dikemukakan oleh Follet *et al.*, 1987, sebagai berikut:

Pemupukan berimbang/keseimbangan Hara =

$$RN_{t_n} = \sum_{t=0}^{t_n} (AP_t + AR_{\Delta t} - RM_{\Delta t} - L_{\Delta t}) \dots\dots\dots 1$$

Dimana :

- RN_{t_n} = hara anorganik dan organik tersisa dalam tanah pada waktu akhir (t_n);
- AP_t = hara anorganik dan organik yang terkandung dalam tanah pada waktu awal (t);
- $AR_{\Delta t}$ = hara anorganik dan organik yang ditambahkan ke dalam tanah dalam interval waktu (Δt);
- $RM_{\Delta t}$ = hara yang dijerap dan diangkut oleh tanaman dalam interval waktu (Δt);

- $L_{\Delta t}$ = hara anorganik dan organik yang hilang dalam interval waktu (Δt);
 t = waktu awal;
 t_n = waktu akhir;
 Δt = interval waktu (antara t dan t_n).

Apabila nilai yang diperoleh:

$(RM_{\Delta t} - L_{\Delta t}) > (Ap_t + AR_{\Delta t})$ maka terjadi penambangan hara,

$(RM_{\Delta t} - L_{\Delta t}) < (Ap_t + AR_{\Delta t})$ maka terjadi penabungan hara.

Dalam penerapannya pemupukan berimbang dapat menggunakan pupuk tunggal, pupuk majemuk atau kombinasi dari pupuk tunggal dan pupuk majemuk. Agar sesuai dengan takaran pemupukan berimbang yang spesifik lokasi, komposisi pupuk majemuk harus bervariasi sesuai kesuburan tanah dan kebutuhan tanaman. Untuk itu pupuk majemuk yang dibuat secara *Physical blending* dianggap lebih fleksibel dibandingkan *chemical blending*.

Penetapan takaran pemupukan berimbang, memerlukan data hasil analisis tanah, terutama analisis kadar P dan K tanah. Yang menjadi permasalahan di lapangan adalah: (1) biaya analisis tanah relatif mahal bagi petani dan (2) belum banyak tersedia laboratorium tanah di sekitar wilayah pertanian. Apabila data analisis tanah belum tersedia, maka rekomendasi pemupukan berimbang dapat didasarkan pada peta status hara P dan K lahan sawah skala 1:50.000 yang telah tersedia di beberapa kabupaten. Dalam lingkup yang lebih spesifik lokasi, rekomendasi pemupukan dapat diverifikasi dengan data percobaan petak omisi (*omission plot*). Wilayah yang belum memiliki peta status hara, maka perlu: (1) membuat peta status hara P dan K skala 1:50.000 atau (2) menganalisis tanah untuk menentukan takaran pupuk.

Status hara P dan K lahan sawah intensifikasi di 18 propinsi di Indonesia telah dipetakan pada skala 1:250.000. Peta skala tinjau ini digunakan sebagai peta arahan distribusi pupuk untuk padi sawah di tingkat provinsi (Sofyan *et al.*, 2000). Untuk langkah operasional lapang penetapan rekomendasi pemupukan P dan K untuk padi sawah, harus berlandaskan peta status hara P dan K dalam skala yang lebih besar atau operasional yaitu skala 1:50.000. Peta status hara tanah ini merupakan salah satu *output* penelitian uji tanah (*soil testing*). Uraian lebih lanjut tentang status hara tanah sawah dapat dibaca pada bab sebelumnya.

Hasil penelitian di berbagai negara di Asia tentang besarnya serapan hara yang terbawa panen dalam gabah dan jerami untuk tingkat produktivitas tertentu dirangkum pada Tabel 1. Apabila rata-rata produksi padi varietas unggul di lahan irigasi adalah sekitar 5 t ha^{-1} , maka hara yang terangkut panen adalah 87,5 kg N, 15 kg P, dan 85 kg K yang tersimpan dalam biomassa bagian atas tanaman. Sebagian hara yang diserap tanaman padi ini berasal dari dalam tanah dan

sisanya berasal dari penambahan pupuk. Jumlah hara yang diserap tanaman padi ini berbeda-beda tergantung varietas tanaman. Padi varietas unggul menyerap hara lima kali lebih banyak dibandingkan varietas lokal yang pada umumnya berumur panjang dan produksinya rendah. Sebaliknya padi hibrida membutuhkan hara yang lebih tinggi dibandingkan varietas unggul biasa (Dierolf, 2000).

Tabel 1. Rata-rata hara yang terangkut panen pada padi varietas unggul

Unsur hara	Total hara terangkut panen		
	Gabah+jerami	Gabah	Jerami
	kg hara t gabah ⁻¹		
N	17,5	10,5	7,0
P	3,0	2,0	1,0
K	17,0	2,5	14,5
Ca	4,0	0,5	3,5
Mg	3,5	1,5	2,0
S	1,8	1,0	0,8
Zn	0,05	0,02	0,03
Si	80	15	65
Fe	0,50	0,20	0,30
Mn	0,50	0,05	0,45
Cu	0,012	0,09	0,003
B	0,015	0,005	0,010

Sumber: Dobermann dan Fairhurst (2000)

Rekomendasi pemupukan berdasar uji tanah

Agar takaran pupuk yang diberikan lebih tepat, efisien dan efektif, maka harus mempertimbangkan faktor kemampuan tanah menyediakan hara dan kebutuhan hara tanaman. Pendekatan ini dinamakan uji tanah (*soil testing*). Secara umum uji tanah adalah suatu kegiatan analisis kimia yang sederhana, cepat, murah, tepat, dan dapat diulang (*reproduceable*) untuk menduga ketersediaan hara tertentu dalam tanah dalam hubungannya dengan kebutuhan hara yang bersangkutan untuk tanaman tertentu dengan tujuan akhir memberikan pelayanan rekomendasi pemupukan spesifik lokasi yang rasional kepada petani.

Agar rekomendasi pupuk dapat diberikan lebih cepat dan mudah, maka diperlukan suatu model rekomendasi pemupukan yang dapat menghitung takaran pupuk spesifik lokasi berdasarkan hasil uji tanah. Untuk itu Puslitbangtanak telah menyusun dan mengembangkan perangkat lunak yang diberi nama PKRS (*P and K recommendation system*). Sebagai tahap awal disusun PKRS versi 1.02 yang merupakan perangkat lunak untuk menghitung takaran pupuk dengan menggunakan bahasa program *Microsoft Visual Basic Version 6.0* yang disusun berdasarkan hasil-hasil penelitian uji tanah dan efisiensi pemupukan serta

berbagai pustaka lainnya. PKRS memberikan rekomendasi untuk komoditas padi sawah, padi gogo, jagung, dan kedelai. Kebutuhan pupuk yang dapat dihitung oleh perangkat lunak ini adalah pupuk N (urea), P (SP-36), dan K (KCl), serta perhitungan kebutuhan kapur dan bahan organik dan kapur (Sulaeman dan Nursyamsi, 2002).

Selain melalui perhitungan data analisis tanah secara langsung dengan model PKRS, takaran pupuk berdasarkan uji tanah untuk padi sawah dapat juga direkomendasikan secara langsung berdasarkan peta status hara tanah P dan K skala 1:50.000.

Berdasarkan penelitian kalibrasi uji P dan K untuk padi sawah di berbagai tingkat status hara dan jenis tanah, maka disusunlah suatu rekomendasi pemupukan P dan K untuk padi sawah dengan varietas unggul (padi inbrida) yang mempunyai tingkat produksi setara IR-64, Ciherang, atau Ciliwung. Takaran pupuk P dan K ditetapkan untuk masing-masing kelompok status P dan K tanah, yaitu rendah, sedang, dan tinggi (Tabel 2). Pemberian pupuk K didasarkan pada kondisi dimana jerami padi dikembalikan atau diangkut ke luar lahan.

Tabel 2. Kelas status hara P dan K tanah sawah serta rekomendasi pemupukannya

Kelas status hara	Kadar hara terekstrak HCl 25%		Rekomendasi pupuk		
	P	K	SP-36	KCl	
	mgP ₂ O ₅ 100g ⁻¹	mgK ₂ O 100g ⁻¹		- jerami	+ jerami
			kg ha ⁻¹		
Rendah	< 20	< 10	100	100	50
Sedang	20 – 40	10 – 20	75	50	0
Tinggi	> 40	> 20	50	50	0

Apabila takaran pemupukan yang diterapkan sesuai dengan rekomendasi uji tanah, maka jika dibandingkan dengan takaran anjuran umum seperti saat ini akan diperoleh penghematan berupa pupuk atau biaya produksi yang cukup nyata (Tabel 3 dan 4) (Rochayati *et al.*, 2002). Jumlah pupuk P yang diperlukan bila didasarkan pada rekomendasi pupuk P untuk padi sawah yang bersifat umum adalah 1.501 ribu t SP-36 tahun⁻¹, namun bila perhitungan didasarkan pada rekomendasi uji tanah, hanya dibutuhkan 1.039 ribu t SP-36 tahun⁻¹. Berdasarkan perhitungan ini, diperoleh penghematan pupuk P sejumlah 462 ribu t SP-36 tahun⁻¹ atau setara dengan 740 milyar rupiah tahun⁻¹ (Tabel 3).

Tabel 3. Penghematan pupuk SP-36 tahun⁻¹ pada lahan sawah intensifikasi di 18 provinsi di Indonesia bila penggunaan pupuk fosfat berdasarkan uji tanah

Provinsi	Rekomendasi	Uji tanah P ²⁾	Penghematan
----------	-------------	---------------------------	-------------

	umum P ¹⁾		Fisik	Nilai
	Ribu t tahun ⁻¹			Milyar Rp. Tahun ⁻¹
Aceh	59,4	40,9	18,5	29,6
Sumatera Utara	106,1	73,4	32,7	52,3
Riau	45,8	35,9	9,9	15,8
Sumatera Barat	52,9	35,4	17,5	28,0
Jambi	45,0	31,0	14,0	22,4
Sumatera Selatan	86,0	70,1	15,9	25,4
Bengkulu	18,0	12,3	5,7	9,1
Lampung	42,6	25,4	17,2	27,5
Jawa Barat	242,7	167,6	75,1	120,2
Jawa Tengah	235,9	163,2	72,7	116,3
Jawa Timur	252,0	171,5	80,5	128,8
Bali	18,3	10,1	8,2	13,1
NTB (P. Lombok)	24,5	12,8	11,7	18,7
Kalimantan Selatan	93,0	69,3	23,7	37,9
Sulawesi Selatan	116,2	78,3	37,8	60,5
Sulawesi Tenggara	14,0	10,9	3,1	5,0
Sulawesi Tengah	31,3	18,9	12,4	19,8
Sulawesi Utara	17,7	12,0	5,7	9,1
Total	1501,4	1039,1	462,3	739,7

Sumber: Rochayati *et al.* (2002).

¹⁾ Rekomendasi pupuk P secara umum = 100 kg SP-36 ha⁻¹ musim⁻¹

²⁾ Rekomendasi pupuk P berdasar uji tanah:

- Status P tinggi : 50 kg SP-36 ha⁻¹ musim⁻¹
- Status P sedang : 75 kg SP-36 ha⁻¹ musim⁻¹
- Status P rendah : 100 kg SP-36 ha⁻¹ musim⁻¹

Satu tahun = 2 musim tanam,

Harga SP-36 = Rp 1.600,- kg⁻¹.

Dengan menggunakan data yang sama, penghematan pemakaian pupuk K apabila jerami dikembalikan ke lahan sawah adalah 1.414 ribu t KCl tahun⁻¹ setara dengan 2.828 milyar rupiah tahun⁻¹. Namun apabila petani hanya menggunakan pupuk KCl (jerami tidak dikembalikan ke lahan), maka penghematan penggunaan pupuk menurun menjadi 523 ribu t KCl tahun⁻¹ setara 1.046 milyar rupiah tahun⁻¹ (Tabel 4).

Tabel 4. Penghematan pupuk KCl tahun⁻¹ pada lahan sawah intensifikasi di 18 Propinsi di Indonesia bila penggunaan pupuk kalium berdasarkan uji tanah

Provinsi	Kebutuhan KCl dengan			Penghematan KCl			
	Rekomendasi umum	Uji tanah ¹⁾	Uji tanah ²⁾	Jumlah ¹⁾	Jumlah ²⁾	Nilai ¹⁾	Nilai ²⁾
x 1000 t tahun ⁻¹				Milyar Rp. tahun ⁻¹			
Aceh	59,4	1,2	33,7	58,2	25,7	116,4	51,4
Sumatera Utara	106,1	1,0	75,6	105,1	30,5	210,2	61
Riau	45,8	0,9	28,0	44,9	17,8	89,8	35,6
Sumatera Barat	52,9	1,9	35,4	51,0	17,5	102	35
Jambi	45,0	5,0	33,1	40,0	11,9	80	23,8
Sumatera Selatan	86,0	1,3	57,3	84,7	28,7	169,4	57,4
Bengkulu	18,0	2,8	13,8	15,2	4,2	30,4	8,4
Lampung	42,6	10,4	34,4	32,2	8,2	64,4	16,4
Jawa Barat	242,7	22,6	168,7	220,1	74,0	440,2	148
Jawa Tengah	235,9	17,5	151,9	218,4	84,0	436,8	168
Jawa Timur	252,0	7,2	150,5	244,8	101,5	489,6	203
Bali	18,3	0,0	9,2	18,3	9,1	36,6	18,2
NTB (Lombok)	24,5	0,0	12,2	24,5	12,3	49	24,6
Kalimantan Selatan	93,0	6,6	66,2	86,4	26,8	172,8	53,6
Sulawesi Selatan	116,2	2,7	65,2	113,5	51,0	227	102
Sulawesi Tenggara	14,0	2,2	11,0	11,8	3,0	23,6	6
Sulawesi Tengah	31,3	3,2	20,5	28,1	10,8	56,2	21,6
Sulawesi Utara	17,7	0,9	11,7	16,8	5,9	33,6	11,8
Total	1501,4	87,4	978,4	1414	522,9	2828	1045,8

Sumber: Rochayati *et al.* (2002)

Rekomendasi pupuk K secara umum = 100 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹

Rekomendasi pupuk K berdasar uji tanah: ¹⁾ bila jerami dikembalikan (5 t ha⁻¹)

Status K tinggi : 0 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹

Status K sedang : 0 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹

Status K rendah : 50 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹

Rekomendasi pupuk K berdasarkan uji tanah²⁾ bila jerami tidak dikembalikan

Status K tinggi : 50 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹

Status K sedang : 50 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹

Status K rendah : 100 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹

Satu tahun = 2 musim tanam

Harga KCl = Rp 2.000,- kg⁻¹

Pupuk P dan K yang dihemat dari lahan sawah yang berstatus P dan K sedang dan tinggi, dapat dialokasikan ke lahan-lahan sawah bukaan baru dan lahan kering yang memerlukan takaran pupuk lebih tinggi. Produktivitas padi di lahan sawah intensifikasi di luar Jawa masih rendah yaitu rata-rata $<4 \text{ t ha}^{-1}$, masih berpeluang ditingkatkan sesuai potensi hasilnya.

Rekomendasi pupuk unsur hara makro sekunder dan unsur mikro

Pemupukan kalsium

Ketersediaan kalsium (Ca) dalam tanah untuk dapat mensuplai kebutuhan tanaman dalam jumlah yang cukup, minimal adalah $>1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, atau kejenuhan basa $>8\%$ dari KTK. Untuk pemenuhan kebutuhan pertumbuhan yang optimal lebih dari 20% KTK harus dijenuhi oleh kalsium, atau terdapat dalam rasio $\text{Ca}_{\text{dd}}:\text{Mg}_{\text{dd}}$ sebesar 3:1 atau 4:1. Jika didekati dari sisi tanaman rasio Ca:Mg yang optimum dalam tanaman pada masa bunting sampai pembungaan adalah 1:1 atau 1,5:1,0.

Hasil penelitian pengelolaan hara terpadu pada tanah sawah intensifikasi di Jawa, Sulawesi Selatan, Nusa Tenggara Barat, dan Lampung menunjukkan bahwa defisiensi Ca lebih berkorelasi dengan jenis bahan induk tanah dibandingkan dengan tingkat pengelolaan lahan (Widowati *et al.*, 2003a). Tanah sawah intensifikasi yang semula diduga telah mengalami defisiensi Ca akibat aplikasi pupuk N, P, dan K takaran tinggi secara terus-menerus, ternyata tidak semuanya mengalami defisiensi Ca. Kahat Ca pada tanah sawah intensifikasi hanya terjadi di Lampung (Widowati *et al.*, 2003b), dan beberapa tanah sawah bukaan baru di Kalimantan Selatan (Widowati *et al.*, 1999).

Saran rekomendasi pemupukan untuk Ca adalah sebesar 24 kg Ca ha^{-1} jika jerami tidak dikembalikan, dan 12 kg Ca ha^{-1} jika jerami dikembalikan. Hal ini didasarkan pada nilai rata-rata serapan total Ca pada gabah dan jerami sebesar 4 kg t^{-1} . Jika rata-rata produktivitas tanaman adalah 6 t ha^{-1} , maka akan menyerap Ca sebesar 24 kg Ca ha^{-1} , dimana sekitar 80% Ca terdapat dalam jerami.

Pemupukan magnesium

Seperti unsur kalsium, ketersediaan unsur magnesium (Mg) pada tanah-tanah sawah intensifikasi di Jawa, Nusa Tenggara Barat, dan Sulawesi Selatan masih cukup, sedangkan di Lampung dan Kalimantan Selatan beberapa tanah sawah mempunyai kadar Mg_{dd} yang sangat rendah diduga bahan induk yang miskin unsur Mg (Widowati *et al.*, 1999; Widowati *et al.*, 2003a). Konsentrasi Mg dalam tanah $<1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ menunjukkan status yang sangat rendah, kadar $>3 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dianggap

sebagai jumlah yang cukup bagi pertumbuhan tanaman. Beberapa penyebab defisiensi Mg adalah bahan induk, serta rasio K:Mg yang lebar (>1:1).

Saran rekomendasi pemupukan Mg adalah sebesar 21 kg Mg ha⁻¹. Jumlah tersebut untuk mengembalikan hara dalam tanah akibat serapan tanaman. Dalam setiap ton gabah terkandung Mg sebesar 3,5 kg. Di dalam tanaman padi, sebagian besar Mg terdapat dalam jerami dibandingkan dalam gabah dengan rasio 60:40%, sehingga pengembalian jerami dalam tanah sangat dianjurkan.

Pemupukan belerang

Hasil penelitian lapang di Jawa menunjukkan bahwa analisis tanah yang menggambarkan status hara belerang (S) dalam tanah saja tidak dapat digunakan untuk menilai kebutuhan pupuk S pada tanah sawah (Santoso *et al.*, 1990). Hasil penelitian tanggap tanaman padi terhadap pemupukan S di 94 lokasi yang tersebar pada status hara S tanah rendah sampai tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar ($\pm 87\%$) menunjukkan tanggap negatif terhadap pemupukan 12-24 kg S ha⁻¹, dan hasilnya pun tidak konsisten dari musim ke musim.

Dobermann dan Faihurst (2000) menetapkan batas kritis S dalam tanah yaitu <9 mg S kg⁻¹ (S terekstrak dalam 0,01 M Ca(H₂PO₄)₂). Rendahnya ketersediaan S dalam tanah dapat disebabkan oleh salah satu dari faktor berikut: kadar S dalam bahan induk rendah, penggunaan pupuk makro primer tanpa S pada pertanaman padi intensif, serta pembakaran jerami. Pemupukan belerang (S) untuk tanaman padi perlu mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi ketersediaan hara S pada lahan sawah.

Hasil identifikasi pada tanah-tanah sawah intensifikasi di Jawa, Nusa Tenggara Barat, dan Sulawesi Selatan di 30 lokasi menunjukkan ada sekitar 18 lokasi yang mempunyai kadar S tersedia <9 mg S kg⁻¹ (0,01 M Ca(H₂PO₄)₂). Tanah-tanah tersebut tersebar di Nusa Tenggara Barat>DI Yogyakarta, Jawa Timur>Jawa Tengah.

Rekomendasi pemupukan S adalah 12 kg S ha⁻¹, dalam bentuk ZA atau kieserite, dengan asumsi serapan S oleh gabah dan jerami adalah sebesar 12 kg S 6 t produksi⁻¹. Akan tetapi jika jerami dikembalikan maka saran rekomendasi pemupukan S sebesar 6 kg S ha⁻¹, karena rasio S dalam gabah dan jerami sebesar 40:60%.

Pemupukan unsur hara mikro

Pemupukan unsur hara mikro harus diperhitungkan dengan sangat hati-hati karena pemberian yang berlebihan dapat meracuni tanaman dan menghambat pertumbuhan. Penggenangan tanah sawah terus-menerus atau tanah sawah yang berdrainase jelek, dapat mengakibatkan menurunnya ketersediaan hara mikro, terutama Zn dan Cu.

Pemupukan N dan P dengan takaran tinggi tanpa pengembalian sisa panen pada lahan sawah intensifikasi secara terus-menerus juga akan mempercepat penurunan ketersediaan hara Zn dan Cu serta hara makro lainnya seperti S, Ca, dan Mg. Terjadinya kekahatan Zn dan Cu di lahan sawah sangat spesifik lokasi tergantung dari kandungannya dalam bahan induk, pH tanah, drainase, kadar bahan organik serta keadaan redoks tanah. Oleh karena itu gejala kekahatan yang terjadi belum tentu disebabkan rendahnya kandungan unsur-unsur mikro tersebut dalam tanah sehingga pemecahannya tidak harus dengan menambah unsur tersebut. Teknologi pemupukan Zn terbaik adalah mencelupkan bibit padi ke dalam larutan 0,05% ZnSO₄ selama 5 menit (Al-Jabri *et al.*, 1990).

Pemupukan cuprum

Hasil identifikasi lahan sawah intensifikasi di Jawa, Sulawesi Selatan, Nusa Tenggara Barat pada tahun 1999 menunjukkan bahwa hampir sebagian besar tanah-tanah sawah intensifikasi tersebut mempunyai kadar cuprum (Cu) >1 ppm, sehingga dapat dikatakan Cu dalam tanah masih cukup. Namun demikian untuk menjaga keseimbangan hara dalam tanah sawah, disarankan pemupukan 5-10 kg Cu ha⁻¹ untuk masa tanam 5 tahun, atau merendam akar bibit padi dalam larutan 1% CuSO₄ selama 1 jam. Serapan Cu oleh tanaman padi adalah sekitar 72 g Cu ha⁻¹ 6 t produksi⁻¹. Cu paling banyak terdapat dalam jerami. Pembakaran jerami tidak menyebabkan Cu ter volatilisasi kecuali hilang terbawa aliran permukaan.

Pemupukan seng

Batas kritis seng (Zn) tersedia dalam tanah adalah <0,8 mg Zn kg⁻¹ (DTPA) (Doberman and Fairhurst, 2000). Hasil identifikasi kadar Zn tanah pada tanah-tanah sawah intensifikasi di 30 daerah di Jawa, Sulawesi Selatan, Nusa Tenggara Barat pada tahun 1999 menunjukkan bahwa ada indikasi kahat akan Zn di empat lokasi yaitu di Kecamatan Demak-Demak, Plupuh-Sragen, Gurah-Kediri, dan Paron-Ngawi.

Rekomendasi pemupukan Zn adalah sebesar 5-10 kg Zn ha⁻¹ dalam bentuk ZnO, ZnCl, atau ZnSO₄ untuk jangka waktu 5 tahun pada tanah sawah intensifikasi (Doberman and Fairhurst, 2000). Total serapan Zn oleh tanaman padi sebesar 300 g 6 t gabah+jerami⁻¹. Pemberian Zn yang paling efektif adalah mencelupkan akar bibit padi ke dalam larutan 0,05% ZnSO₄ selama 5 menit (Al-Jabri *et al.*, 1990). Untuk mengurangi kejadian kahat Zn pada tanah, bahan organik berupa jerami supaya dikembalikan ke dalam tanah, karena 60% Zn terdapat dalam jerami.

Pemupukan besi

Batas kritis defisiensi besi (Fe) dalam tanah adalah < 4-5 mg Fe kg⁻¹ tanah (DTPA-CaCl₂, pH 7,3). Keadaan demikian umumnya terdapat pada tanah-tanah pH tinggi atau alkalin, serta tanah yang mempunyai rasio Fe:P sangat lebar (Doberman and Fairhurst, 2000). Hasil survei di lahan sawah intensifikasi di Jawa, Nusa Tenggara Barat, dan Sulawesi Selatan menunjukkan tanah-tanah tersebut masih mengandung Fe cukup (Widowati *et al.*, 2003). Sebaliknya, di beberapa lahan sawah intensifikasi di Kalimantan Selatan dan Lampung mempunyai kadar Fe melampaui batas kritis (batas beracun) yaitu >300 mg kg⁻¹.

Rekomendasi pemupukan Fe pada tanah-tanah sawah intensifikasi adalah mengembalikan jerami sisa panen atau memupuk dengan bahan organik lainnya setiap musim tanam. Serapan Fe permusim tanam dengan produktivitas gabah 6 t ha⁻¹ adalah 500 g Fe. Sekitar 50% dari Fe yang diserap tanaman terdapat dalam jerami.

Pemupukan mangan

Kahat mangan (Mn) tampak pada tanah sawah yang telah mengalami pelapukan lanjut, atau tanah-tanah yang banyak mengandung Fe. Batas kritis (meracun) Mn dalam tanah adalah <1 mg Mn kg⁻¹ (DTPA+CaCl₂, pH 7,3) (Doberman and Fairhurst, 2000).

Hasil pengamatan pada tanah-tanah sawah intensifikasi dari Jawa, Nusa Tenggara Barat, dan Sulawesi Selatan menunjukkan bahwa tanah-tanah sawah tersebut masih cukup mengandung unsur Mn. Untuk tanah-tanah yang kahat Mn, saran rekomendasi pemupukan adalah 5-20 kg MnSO₄ atau MnO ha⁻¹ pada larikan padi. Serapan unsur ini setiap kali panen sebesar 3 kg Mn 6 t gabah dan jerami⁻¹.

PENINGKATAN EFISIENSI PENGGUNAAN PUPUK

Efisiensi penggunaan pupuk dapat ditingkatkan antara lain melalui modifikasi butiran pupuk, perbaikan waktu pemberian dan teknik pemberian pupuk, ameliorasi, pemberian pupuk organik dan pupuk hayati serta perbaikan takaran anjuran pemupukan. Rekomendasi pemupukan spesifik lokasi disusun agar takaran pupuk lebih rasional dan berimbang berdasarkan kemampuan tanah menyediakan hara dan kebutuhan hara tanaman sehingga efisiensi penggunaan pupuk dan produksi meningkat tanpa merusak lingkungan akibat pemupukan yang berlebihan.

Pemupukan nitrogen

Penggunaan pupuk nitrogen (N) dalam bentuk urea di lahan sawah dengan cara disebar memberikan efisiensi yang sangat rendah (20-30%). Lebih dari 70% urea yang diberikan hilang melalui proses volatilisasi amonia (NH_3), nitrifikasi – denitrifikasi, imobilisasi N oleh jasad mikro, pencucian dan fiksasi NH_4 oleh tanah. Di antara mekanisme tersebut yang terbesar adalah volatilisasi amonia (NH_3) karena sumber N utama padi sawah adalah urea (Wetselaar *et al.*, 1984).

Efisiensi pemupukan nitrogen ditingkatkan dengan membenamkan pupuk urea ke lapisan reduksi untuk menekan kehilangan N. Teknologi yang telah dihasilkan adalah memodifikasi bentuk dan ukuran butiran menjadi urea super granul (USG), urea briket atau urea tablet yang mempunyai berat sekitar satu gram. Urea tersedia lambat (*slow release urea*) dapat pula dimodifikasi dengan melapisi atau membungkus urea butiran dengan sulfur (SCU) atau silika (SiCU).

Penelitian penggunaan pupuk *sulphur coated urea* (SCU) dan urea super granule (USG) telah dimulai pada tahun 1980-1982 di beberapa lokasi lahan sawah intensif di Jawa pada tanah bertekstur ringan dan tekstur berat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara agronomis pemakaian SCU dan USG meningkatkan efisiensi pupuk urea dan mengurangi takaran N yang dibutuhkan untuk mendapatkan hasil tertentu dibandingkan urea pril (Tabel 5). Efisiensi pemupukan SCU dan USG lebih tinggi pada tanah bertekstur berat dibandingkan tanah bertekstur ringan (Prawirasumantri *et al.*, 1983; Dennis *et al.*, 1983). Secara ekonomis, pupuk SCU dan USG menguntungkan dibandingkan dengan urea pril (butiran).

Tabel 5. Perbandingan takaran dan sumber pupuk nitrogen terhadap hasil gabah IR-36 di berbagai lokasi

Takaran N	Berat kering gabah
-----------	--------------------

	Tegal Gondo	Cangakan	Mojosari	Ciomas	Boyolali	Cianjur
kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹					
Urea prill						
0	2,80	3,05	4,04	5,65	2,54	3,67
29	3,38	4,10	4,42	5,66	2,93	3,95
58	3,86	4,60	4,95	5,85	3,55	4,55
87	4,15	5,15	4,34	5,37	3,71	6,27
SCU						
0	2,80	3,05	4,04	5,65	2,54	3,67
29	3,67	5,15	4,27	5,32	3,15	4,28
58	4,29	6,20	4,89	6,05	3,72	5,55
87	4,40	7,15	3,67	5,05	4,65	5,97
USG						
0	2,80	3,05	4,04	5,65	2,54	3,67
29	3,87	4,95	5,05	5,67	3,46	4,33
58	4,31	6,25	4,89	5,70	4,09	5,43
87	4,47	7,40	4,59	5,72	4,82	5,23

Sumber: Prawirasumantri *et al.* (1983); Dennis *et al.* (1983)

Penelitian serupa di Sukamandi menunjukkan bahwa pemupukan USG meningkatkan efisiensi pupuk (kg gabah kg N⁻¹) dibandingkan urea prill dan pupuk pelepas lambat seperti urea guanil, urea dengan penghambat PPD, dan urea osmocote (OSM) (Prawirasumantri *et al.*, 1986). Takaran optimum N dicapai pada takaran 58 kg N ha⁻¹ yang menghasilkan gabah 15-20 kg gabah kering kg N⁻¹ yang ditambahkan.

Penelitian penggunaan urea briket dengan ukuran satu gram dan dibenamkan di lapisan reduksi pada lahan sawah di Jawa memberikan respon hasil dan keuntungan yang lebih tinggi daripada urea butiran yang disebar (Tabel 6). Berdasarkan hasil demplot disimpulkan bahwa penggunaan urea tablet dapat menghemat penggunaan pupuk urea butiran rata-rata sebesar 25% dan hasilnya meningkat rata-rata 0,5 t ha⁻¹ (Thamrin dan Aspan, 1988). Meskipun urea tablet/briket sudah dibuktikan lebih unggul dari urea butiran, namun karena biaya produksi 10% lebih tinggi dibanding urea prill serta aplikasinya di lapangan mengalami beberapa kendala, maka saat ini urea tablet sudah tidak diproduksi lagi.

Tabel 6. Penghematan pupuk urea, kenaikan hasil gabah dan perkiraan keuntungan dalam setahun penggunaan urea briket

Parameter	Keuntungan/tahun		
	Oxisol dari Subang	Entisol dari Klaten	Vertisol dari Ngawi
Penghematan urea (kg ha ⁻¹)	0	189	186
Kenaikan hasil gabah (kg ha ⁻¹)	455	889	492
Keuntungan (Rupiah)	19.000	159.000	82.000

Catatan: Dalam 1 tahun ada 2 musim tanam
 Sumber: Rochayati *et al.* (1990)

Hasil penelitian menunjukkan pemupukan nitrogen sebanyak 250 kg urea/ha telah mencukupi kebutuhan tanaman padi. Efisiensi pupuk N juga dapat ditingkatkan dengan cara pemberian pupuk di-split dua atau tiga kali. Agar waktu pemberian pupuk lebih teliti dan tepat maka dapat dilakukan dengan bantuan alat yang disebut bagan warna daun (*leaf color chart – LCC*). Dengan menggunakan alat ini dapat diputuskan apakah tanaman padi perlu segera diberi pupuk N atau tidak sesuai dengan kebutuhan tanaman sehingga efisiensi nitrogen dapat ditingkatkan. Pemberian pupuk N berdasarkan pengamatan warna menggunakan LCC dapat menekan biaya pembelian pupuk sebanyak 15-20% dari rekomendasi yang umum digunakan tanpa mengurangi hasil (Anonim, 1998).

Pemupukan fosfor

Prinsip pemupukan fosfor (P) yang perlu diperhatikan adalah kandungan P dalam tanah. Pada tanah yang mempunyai kandungan P tinggi, pemupukan P dimaksudkan hanya untuk memenuhi atau mengganti P yang diangkut oleh tanaman padi, sedangkan pada tanah yang mempunyai kandungan P sedang dan rendah, pemupukan P selain untuk menggantikan P yang terangkut tanaman juga untuk meningkatkan kadar P tanah sehingga diharapkan pada waktu yang akan datang kandungan P tanah (status P tanah) berubah dari rendah dan sedang menjadi tinggi (Sofyan *et al.*, 2002). Dengan kata lain pemupukan P yang lebih tinggi dari kebutuhan tanaman dapat memperkaya tanah.

Hasil penelitian kalibrasi uji P menunjukkan bahwa tanah sawah berkadar P tinggi cukup dipupuk 50 kg TSP (SP-36) ha⁻¹ sebagai perawatan, sedang untuk tanah sawah berkadar P sedang dan P rendah dipupuk masing-masing 75 kg TSP (SP-36) ha⁻¹ dan 100 kg TSP (SP-36) ha⁻¹. Namun demikian untuk mendapatkan takaran yang lebih tepat, maka pemupukan P pada berbagai tipe tanah sawah harus didasarkan pada uji tanah. Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa pemupukan P berdasarkan uji tanah dapat meningkatkan efisiensi pupuk P

sebesar 170 kg gabah kg P⁻¹ (49%) dibandingkan dengan pemupukan rekomendasi umum nasional dan memberikan rata-rata hasil gabah yang hampir sama atau dengan kata lain tanpa mengurangi produktivitas yaitu sekitar 55,5-55,7 ku ha⁻¹ (Tabel 7).

Tabel 7. Rata-rata produktivitas dan efisiensi pupuk P berdasarkan rekomendasi nasional dan uji tanah pada berbagai status hara P lahan sawah intensifikasi

Status P tanah	Produktivitas		Efisiensi pupuk P		Peningkatan
	Rekomendasi nasional	Berdasarkan uji tanah	Rekomendasi nasional	Berdasarkan uji tanah	
	ku ha ⁻¹		kg gabah kg P ⁻¹		
Tinggi	63,3	63,5	39,6	794	398
Sedang	53,3	53,5	33,3	446	113
Rendah	50,0	50,0	312	312	0
Rata-rata	55,5	55,7	347	517	170 (49%)

Takaran rekomendasi nasional = 100 kg SP-36 ha⁻¹

Takaran berdasarkan uji tanah: status P tinggi, sedang, dan rendah masing-masing 50; 75; dan 100 kg SP-36 ha⁻¹

Pemupukan kalium

Pupuk kalium (K) dalam bentuk KCl merupakan sumber utama pupuk K pada lahan sawah, kecuali untuk tanaman tembakau dimana sumber K adalah K₂SO₄. Sekitar 80% K yang diserap tanaman padi berada dalam jerami, oleh karena itu dianjurkan untuk mengembalikan jerami ke lahan sawah. Tanah dengan kandungan K sedang dan tinggi tidak perlu diberi pupuk K karena kebutuhan K padi sawah pada lahan sawah yang berkadar K sedang dan tinggi sudah dapat dipenuhi dari K tanah, sumbangan air pengairan, dan pengembalian jerami.

Hasil penelitian kalibrasi uji K tanah menunjukkan bahwa pemupukan K dapat meningkatkan efisiensi pupuk K sebesar 91 kg gabah kg⁻¹ K dibandingkan dengan pemupukan rekomendasi nasional dan memberikan rata-rata hasil gabah hampir sama atau dengan kata lain tanpa mengurangi produktivitas yaitu sekitar 50,5-50,8 ku ha⁻¹ (Tabel 8).

Tabel 8. Rata-rata produktivitas padi dan efisiensi pupuk K berdasarkan rekomendasi nasional dan uji tanah pada berbagai status hara K lahan sawah intensifikasi

Status K tanah	Produktivitas		Efisiensi Pupuk K		Peningkatan
	Rekomendasi nasional	Berdasarkan uji tanah	Rekomendasi nasional	Berdasarkan uji tanah	
	— ku ha ⁻¹ —		— kg gabah kg P ⁻¹ —		
Tinggi	54,2	55,6	108	*)	-
Sedang	51,7	51,3	104	*)	-
Rendah	45,6	45,5	91	182	91

Rekomendasi nasional = 100 kg KCl ha⁻¹

Berdasarkan uji tanah : status K tinggi, sedang, dan rendah masing-masing 0; 0; dan 50 kg KCl ha⁻¹

*) Efisiensi K (kg gabah kg⁻¹ K) tidak dapat dihitung karena takaran pupuk K pada status tinggi dan sedang adalah 0 kg KCl ha⁻¹ (tanpa pupuk K).

Dari hasil penelitian dilaporkan bahwa pada tanah dengan kandungan K rendah, kemungkinan untuk memperoleh respon pemupukan kalium cukup besar, sedangkan pada tanah dengan kandungan K sedang dan tinggi tidak menunjukkan respon terhadap pemupukan K (Puslittanak, 1992).

Pemupukan K hanya dianjurkan untuk lahan sawah berkadar K rendah, berdrainase buruk dan berkadar karbonat tinggi dengan takaran 50 kg KCl ha⁻¹ yang disertai dengan pengembalian jerami sisa panen ke dalam tanah (Soepartini, 1995).

Pupuk majemuk

Pupuk majemuk didefinisikan sebagai pupuk yang mengandung lebih dari satu unsur hara utama. Pemakaian pupuk majemuk di lahan sawah belum terlalu banyak. Namun demikian pada beberapa tahun terakhir, pemakaian pupuk majemuk mulai meningkat sebagai akibat dari seringnya terjadi kelangkaan pupuk tunggal seperti urea pada saat tanam.

Penggunaan pupuk majemuk yang mengandung lebih dari satu unsur hara dan bersifat lambat tersedia telah dimulai sejak awal 1970 untuk tanaman pangan dan perkebunan. Pupuk majemuk yang biasa digunakan adalah NP 16:20 dan NPK 15:15:15. Hasil penelitian penggunaan pupuk majemuk untuk tanaman pangan masih sangat terbatas. Umumnya pupuk majemuk memberikan kenaikan hasil yang sama atau lebih baik dari pupuk tunggal. Penggunaan pupuk Nitrofosfat 23:23 meningkatkan hasil jagung dan gabah kering dengan nyata pada tanah Ultisol di Terbanggi, Nakau dan Sitiung dan Indralaya, Palembang (Puslittanak, 1987, 1990).

Pupuk CAN (Calsium Amonium Nitrat) takaran 400 kg ha⁻¹ juga lebih efektif di sawah pasang surut Kalimantan Selatan (Puslittanak, 1990). Namun sayangnya pupuk majemuk tersebut masih diimpor sehingga harga per satuan haranya lebih tinggi dibanding pupuk tunggal. Penggunaan pupuk majemuk

mempunyai beberapa kelebihan dan kekurangan dibandingkan pupuk tunggal. Keuntungannya antara lain: (1) mengandung lebih dari satu unsur hara, sehingga dapat menghemat waktu aplikasi dan tempat penyimpanan pupuk; (2) menghemat biaya pemupukan karena diberikan sekaligus untuk beberapa unsur hara; (3) bila takaran dan formula pupuk sesuai dengan kebutuhan tanaman maka efisiensi pemupukan akan meningkat; dan (4) formula pupuk majemuk biasanya ditambah dengan unsur mikro.

Kelemahan pupuk majemuk antara lain: (1) pupuk majemuk tidak dapat digunakan untuk tanaman yang membutuhkan aplikasi beberapa kali dengan cara pemberian berbeda; (2) pupuk majemuk dengan formula tertentu tidak dapat digunakan secara spesifik lokasi; (3) harga per unit hara umumnya lebih tinggi dari pada pupuk tunggal; (4) tidak semua jenis pupuk tunggal dapat dicampur bersama-sama; (5) penggunaan pupuk majemuk masih memerlukan penambahan pupuk tunggal; dan (6) pupuk majemuk menjadi tidak efisien karena mengandung hara yang tidak dibutuhkan tanaman.

Mengingat hal tersebut di atas produsen pupuk majemuk harus dapat menciptakan komposisi pupuk majemuk yang beragam sesuai dengan kondisi tanah dan kebutuhan tanaman. Di lapangan dapat juga diperoleh pupuk majemuk dengan mencampur pupuk tunggal secara fisik atau *physical blending* sesuai dengan kebutuhan takaran anjuran pupuk yang spesifik lokasi. Peran uji tanah dalam pembuatan formula pupuk majemuk sangat penting dan merupakan bagian integral dari kegiatan penelitian dan pengujian sebelum penggunaan pupuk majemuk diterapkan (Karama *et al.*, 1996).

Hasil penelitian penggunaan pupuk tunggal dibandingkan pupuk majemuk NPK 15:15:15 Phonska di lahan sawah intensifikasi berstatus P dan K sedang dan tinggi di Karawang dan Serang menunjukkan bahwa pemupukan NPK bentuk tunggal dan majemuk nyata meningkatkan jumlah anakan dan tinggi tanaman saat panen berat jerami kering dan berat gabah kering, tetapi tidak berpengaruh terhadap nisbah gabah/jerami (Tabel 9) (Anonim, 2003c). Pemupukan NPK dari Phonska berpengaruh sama baiknya dengan NPK tunggal dengan takaran setara uji tanah. Demikian juga dengan NPK Phonska takaran setara uji tanah, dan NPK tunggal takaran setara Phonska. Dengan kata lain, bentuk dan takaran pupuk tunggal maupun majemuk mempunyai efektivitas sama dalam meningkatkan hasil padi.

Tabel 9. Pengaruh pemupukan NPK terhadap tinggi tanaman dan jumlah anakan saat panen, berat jerami dan gabah kering giling di Karawang, musim hujan (MH) 2002/2003

Perlakuan	Σ anakan	T. tanaman cm	Berat jerami —t ha ⁻¹ —	GKG (14%)	Rasio gabah/ jerami
Kontrol	9,86 b	100 b	5,12 b	3,91 b	0,946 a
NPK berdasarkan uji tanah	15,8 a	113 a	7,89 a	5,42 a	0,888 a
NPK Phonska rekomendasi	16,7 a	114 a	7,91 a	5,37 a	1,034 a
NPK tunggal setara Phonska	16,6 a	114 a	7,00 a	5,09 a	0,932 a
NPK Phonska setara uji tanah	15,7 a	115 a	7,42 a	5,30 a	0,920 a

Keterangan: Angka dalam kolom yang diikuti huruf yang sama berarti tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji DMRT. ; GKG = berat gabah kering giling

Berdasarkan pengujian di atas dapat disimpulkan bahwa pada tanah berstatus P dan K sedang, takaran NPK Phonska terbaik dan efisien adalah 180 kg ditambah 240 kg urea ha⁻¹, atau sekitar 40% lebih rendah dari takaran pabrik 300 kg NPK Phonska + 100 kg urea + 50 kg Za ha⁻¹.

Pengujian pupuk NPK majemuk dengan formula 20:10:10 Pelangi di Blitar menunjukkan bahwa NPK 20:10:10 lebih efisien bila diberikan dua kali dengan takaran rekomendasi 400 kg ha⁻¹ + 25 kg urea granul ha⁻¹ (Tabel 10). Hasil gabah kering panen mencapai 20 t ha⁻¹ dan jerami 6 t ha⁻¹.

Tabel 10. Pengaruh pemupukan NPK 20:10:10 terhadap komponen hasil dan hasil padi di Blitar MH 2002/2003

Perlakuan	Hasil GKP — t ha ⁻¹ —	Hasil jerami	Rasio gabah/jerami
Kontrol	4,43 c	11,19 d	0,39
NPK 400(1x)+200	5,49 b	18,52 ab	0,29
NPK 400(2x)+200	6,42 a	18,05 bc	0,35
NPK 400(1x)+100	5,50 b	19,13 ab	0,29
NPK 400(2x)+200	6,38 a	19,15 ab	0,33
NPK 400(1x)+25	5,50 b	18,88 ab	0,29
NPK 400(2x)+25	6,05 ab	20,17 ab	0,30
P+K+UP	6,58 a	20,73 a	0,32
P+K+UP	6,28 a	20,05 ab	0,31
P+UP	5,37 a	16,10 c	0,33

Keterangan: Angka dalam kolom yang diikuti huruf yang sama berarti tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji DMRT. GKP=berat gabah kering panen, UG=urea granul, UP=urea prill

Pengujian di Jombang menunjukkan pemberian NPK 20:10:10 lebih efisien

bila diberikan dua kali dengan takaran rekomendasi 400 kg ha⁻¹ + 150 kg urea granul ha⁻¹ (Tabel 14). Hasil gabah kering panen mencapai 23 t ha⁻¹ dan jerami 5,7 t ha⁻¹. Namun hasil ini tidak berbeda nyata dengan penambahan urea granul 25 kg ha⁻¹.

Tabel 11. Pengaruh pemupukan NPK 20:10:10 terhadap komponen hasil dan hasil padi di Jombang MH 2002/2003

Perlakuan	Hasil GKP	Hasil jerami	Rasio gabah/jerami
	t ha ⁻¹		
Kontrol	3,82 c	11,00 c	0,34
NPK 400(1x)+200	5,60 b	19,88 ab	0,28
NPK 400(2x)+200	5,73 a	21,13 ab	0,27
NPK 400(1x)+100	5,85 b	20,00 ab	0,29
NPK 400(2x)+200	5,73 a	23,00 a	0,25
NPK 400(1x)+25	5,29 b	19,88 ab	0,26
NPK 400(2x)+25	5,28 ab	20,50 ab	0,25
P+K+UP	5,11 a	20,00 ab	0,25
P+K+UP	5,72 a	19,95 ab	0,28
P+UP	5,04 a	17,25 b	0,29

Keterangan: Angka dalam kolom yang diikuti huruf yang sama berarti tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji DMRT. GKP = berat gabah kering panen, UG=urea granul, UP=urea prill

PENGELOLAAN HARA TANAMAN TERPADU

Sejalan dengan meningkatnya kepedulian masyarakat terhadap kesehatan dan pelestarian lingkungan, maka teknologi peningkatan produktivitas tanah dan tanaman harus ramah lingkungan agar lahan dapat digunakan dalam jangka panjang. Maka praktek eksploitasi sumber daya lahan secara kimiawi harus diminimalkan, sebaliknya upaya-upaya meningkatkan penggunaan bahan organik untuk mendorong keragaman hayati tanah harus ditingkatkan.

Fenomena penurunan produktivitas lahan-lahan pertanian tidak saja terjadi di Indonesia, namun juga berlangsung di beberapa negara lain di Asia. Dilaporkan telah terjadi penurunan hasil padi di beberapa negara Asia dari lahan sawah yang ditanami padi dua hingga tiga kali per tahun, meskipun dengan tingkat pengelolaan optimal sesuai rekomendasi. Faktor utama yang menyebabkan penurunan hasil ini diduga adalah menurunnya kadar bahan organik tanah dan hara P, K, S dan Zn, serta akumulasi bahan beracun dalam tanah yang berasal dari pupuk, pestisida atau polutan lain.

Keberadaan bahan organik tanah sangat berpengaruh dalam

mempertahankan kelestarian dan produktivitas tanah serta kualitas tanah melalui aktivitas mikroba tanah dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah. Sehingga dapat dikatakan bahwa tanah yang kandungan bahan organiknya rendah, akan berkurang daya saingnya terhadap segala aktivitas kimia, fisik, dan biologis tanahnya. Untuk memperbaiki kondisi tersebut perlu diupayakan peningkatan kualitas dan kuantitas bahan organik dalam tanah.

Melalui pengelolaan hara terpadu (*integrated plant nutrient management*) yang ramah lingkungan, diharapkan produktivitas lahan-lahan pertanian yang sudah menurun dapat ditingkatkan kembali. Pengelolaan hara terpadu mensyaratkan dioptimalkannya penggunaan pupuk organik dan pupuk hayati disamping pupuk anorganik dalam proses produksinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan hara terpadu dapat meningkatkan produksi tanaman secara berkelanjutan (Adimihardja dan Adiningsih, 2000). Sebagai contoh, pemakaian pupuk organik sebagai sumber N (legum, azolla, sesbania, crotalaria, dan lain-lain) mempunyai manfaat ganda karena selain berfungsi sebagai sumber hara juga dapat memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan aktivitas biologis tanah. Namun dengan semakin pendeknya waktu bera antarmusim tanam serta meningkatnya nilai ekonomis lahan sawah, maka praktek budi daya ini sudah ditinggalkan kecuali di beberapa daerah yang mempunyai intensitas tanam rendah.

Pupuk organik

Pupuk organik dapat dibuat dari berbagai jenis bahan, antara lain sisa tanaman (jerami, brangkasan, tongkol jagung, bagas tebu, sabut kelapa), serbuk gergaji, kotoran hewan, limbah media jamur, limbah pasar, rumah tangga, dan pabrik, serta pupuk hijau. Oleh karena bahan dasar pembuatan pupuk organik sangat bervariasi, maka kualitas pupuk yang dihasilkan sangat beragam sesuai dengan kualitas bahan dasar.

Pupuk organik dapat diaplikasikan dalam bentuk bahan segar atau yang sudah dikomposkan. Pemakaian pupuk organik segar memerlukan jumlah yang banyak, sulit penempatannya, memerlukan waktu dekomposisi lama. Namun demikian, hal ini justru bermanfaat untuk konservasi tanah dan air, karena dapat melindungi permukaan tanah dari percikan air hujan. Pengomposan bahan organik dari sisa tanaman dan kotoran ternak akan memperkecil volume bahan dasar dan mematangkan pupuk sehingga hara segera tersedia bagi tanaman.

Pengetahuan tentang peranan pupuk organik bagi produksi pertanian sudah lama dikenal. Sebelum pupuk anorganik seperti urea, TSP, KCl, Za diperkenalkan pada petani, khususnya petani padi sawah, mereka sebenarnya telah lama menggunakan pupuk organik seperti jerami, pupuk hijau yang dirotasikan atau tumpang sari dengan padi sawah, dan pupuk kandang. Namun setelah pupuk anorganik diperkenalkan, penggunaan pupuk organik kurang

diperhatikan bahkan diabaikan. Petani hanya bersandar pada pupuk anorganik yang penggunaannya terus meningkat tetapi keefisienannya menurun.

Dilaporkan bahwa akibat penanaman terus-menerus dan semua hasil panen diangkut keluar, maka sebagian besar lahan sawah berkadar bahan organik sangat rendah (C-organik <2%). Terdapat korelasi positif antara kadar bahan organik dan produktivitas tanaman padi sawah dimana makin rendah kadar bahan organik makin rendah produktivitas lahan (Adiningsih dan Rochayati, 1988). Bahan organik berperan sebagai penyangga biologi sehingga tanah dapat menyediakan hara dalam jumlah berimbang untuk tanaman. Tanah miskin bahan organik akan berkurang kemampuan daya sangga terhadap pupuk, sehingga efisiensi pupuk anorganik berkurang karena sebagian besar pupuk akan hilang dari lingkungan perakaran (Go Ban Hong, 1977). Mengingat pentingnya peranan bahan organik terhadap kesuburan fisik, kimia dan biologi tanah, maka hara harus dikelola secara terpadu dimana pemberian pupuk anorganik berdasarkan uji tanah dikombinasikan dengan pemupukan organik.

Pengembalian jerami ke tanah dapat memperlambat pemiskinan K dan Si tanah. Hasil penelitian Adiningsih (1984) dengan membenamkan jerami 5 t ha⁻¹ musim⁻¹ selama 4 musim pada tanah kahat K menunjukkan bahwa selain dapat mensubstitusi keperluan pupuk K, jerami dapat meningkatkan produksi melalui perbaikan sifat kimia maupun fisika tanah (Tabel 16). Setelah 4 musim tanam, jerami dapat meningkatkan kadar C-organik, K-dapat ditukar, Mg-dapat ditukar, kapasitas tukar kation (KTK) tanah, Si tersedia dan stabilitas agregat tanah. Apabila dihitung dalam hektar, sumbangan hara dari jerami setara dengan 170 kg K, 160 kg Mg, 200 kg Si dan 1,7 t C-organik ha⁻¹ yang sangat diperlukan bagi aktivitas jasad renik tanah. Peningkatan stabilitas agregat tanah dapat memperbaiki struktur tanah sawah yang memadat akibat penggenangan dan pelumpuran terus-menerus. Tanah menjadi lebih mudah diolah dan sangat baik bagi pertumbuhan akar tanaman palawija yang ditanam setelah padi.

Tabel 12. Pengaruh jerami terhadap kesuburan kimia dan fisika tanah sawah Latosol di Jawa Barat setelah 4 musim tanam

Perlakuan	C-org	N	P	K	Mg	KTK	Si	Stabilitas agregat
	—— % ——		—— me/100g ——			ppm		
Tanpa jerami	2,40	0,28	17	0,13	0,50	18	50	60
Ditambah jerami	3,90	0,33	18	0,35	0,75	20	150	80

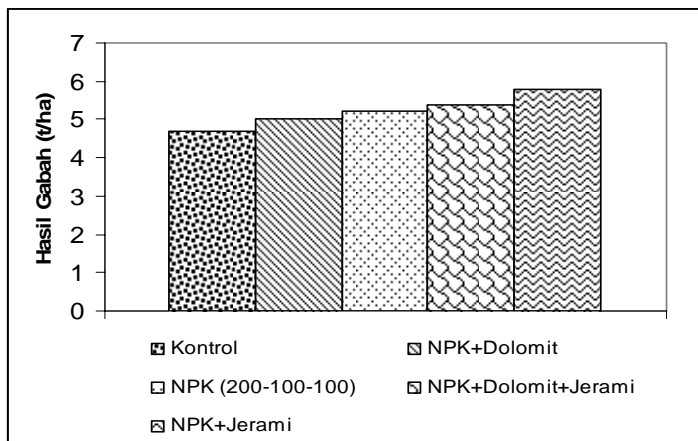
Sumber: Adiningsih, 1984

Hasil penelitian pengaruh jerami selama 6 musim di tanah Latosol di Cicurug Sukabumi yang mempunyai tingkat kesuburan tanah cukup baik menunjukkan bahwa pemberian jerami meningkatkan hasil padi dan efisiensi

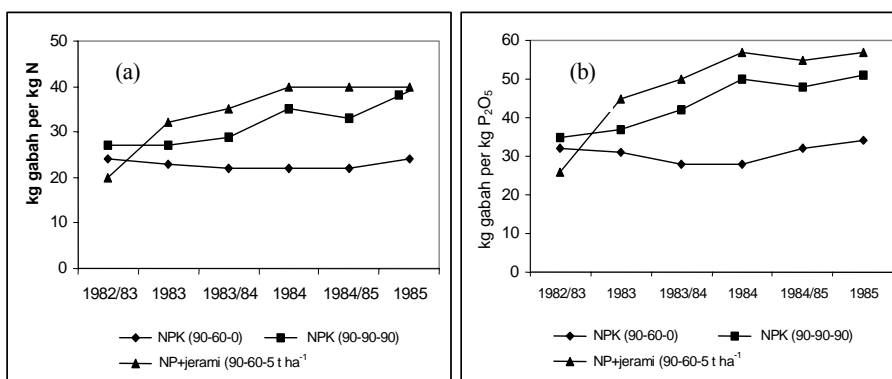
pupuk N dan P. Pemupukan urea 200 kg ha⁻¹ dan TSP 150 kg ha⁻¹ + 5 t jerami menghasilkan gabah sekitar 7 t ha⁻¹ dan meningkatkan efisiensi pupuk N dan P (Adiningsih, 1986).

Pengembalian jerami 5 t ha⁻¹ disertai pupuk N, P, K serta dolomit dapat meningkatkan hasil gabah sekitar 40% (1,7 t ha⁻¹) dibandingkan kontrol pada lahan sawah intensifikasi di Sumatera Barat (Gambar 2). Pengembalian jerami yang dikombinasikan dengan 5 t pupuk kandang ha⁻¹ dapat meningkatkan hasil padi sekitar 1,0 t ha⁻¹ (Gambar 3).

Pemanfaatan tanaman legum yang mempunyai kemampuan memfiksasi N₂ udara seperti *Crotalaria juncea*, *Azolla microphylla* dan *Sesbania rostrata* di lahan sawah menunjukkan peningkatan hasil yang nyata. Pembenaman *Sesbania rostrata* (berumur 45 hari) yang tahan terhadap genangan dan membentuk bintil pada batangnya dapat menyumbangkan biomas 12,5 t ha⁻¹ setara dengan 75 kg N ha⁻¹ atau mensubstitusi lebih dari 50% takaran anjuran urea (Adiningsih, 1988). Demikian pula dengan *Azolla microphylla* yang ditumbuhkan bersama-sama padi sawah dan ditanam secara berkala dapat menyumbang sekitar 40 t biomassa setara dengan 60 kg N ha⁻¹ serta meningkatkan KTK dan C-organik tanah (Prihatini dan Komariah, 1988).



Gambar 2. Pengaruh pengelolaan hara terpadu pada hasil gabah pada lahan sawah di Sumatera Barat dan Lampung



Gambar 3. Efisiensi pupuk N (a) dan P (b) selama beberapa musim yang diperoleh dari pemupukan dan pemberian jerami di Sukabumi, Jawa Barat (Adiningsih *et al.*, 1988)

PELUANG DAN KENDALA PENERAPAN TEKNOLOGI PEMUPUKAN BERIMBANG DI LAHAN SAWAH

Peluang

1. Pemupukan secara lebih rasional dan berimbang adalah salah satu faktor kunci untuk dapat memperbaiki dan meningkatkan produktivitas lahan pertanian, khususnya di daerah tropika di mana kecukupan hara merupakan salah satu faktor pembatas. Penggunaan pupuk yang lebih rasional dan berimbang berarti harus memperhatikan kadar unsur hara di dalam tanah, jenis dan mutu pupuk, dan keadaan pedo-agroklimat serta mempertimbangkan unsur hara yang diperlukan tanaman untuk pertumbuhan dan produksi optimum.
2. Pendekatan ini dapat dilaksanakan dengan baik dan menguntungkan jika rekomendasi pemupukan dilandasi oleh kegiatan uji tanah dan analisis tanaman berdasarkan metodologi yang tepat dan teruji. Pendekatan uji tanah dan analisis tanaman tersebut sebagai dasar rekomendasi pemupukan telah dilaksanakan dan berhasil baik di negara-negara yang didukung oleh IPTEK yang maju dan berkembang.
3. Penghapusan subsidi pupuk pada tahun 1998 kemudian diikuti dengan terjadinya kelangkaan pupuk tunggal di lapangan serta adanya kebijakan pintu terbuka di bidang pupuk telah memicu harga pupuk menjadi mahal dan

muncul berbagai jenis dan formula pupuk baru yang belum diketahui mutu dan efektivitasnya secara teknis. Agar pupuk dapat digunakan lebih efisien dan efektif serta menguntungkan petani, maka diperlukan regulasi dan rasionalisasi di bidang pupuk dengan berorientasi pada teknologi pemupukan berimbang yang penerapannya didasarkan pada uji tanah.

4. Peluang penerapan teknologi pengelolaan hara terpadu membutuhkan dukungan komponen pupuk organik dan atau pupuk hayati. Untuk mendukung program ini, perlu dilakukan integrasi antara komponen ternak dan padi yang saling menguntungkan.

Kendala

1. Belum tersedianya sarana yang memadai seperti laboratorium uji tanah di semua daerah. Laboratorium uji tanah yang dapat melayani petani atau pengguna lainnya untuk membuat rekomendasi pemupukan berimbang spesifik lokasi baru tersedia di daerah tertentu. Untuk itu diperlukan terobosan teknologi untuk membuat alat analisis tanah di lapangan.
2. Belum adanya koordinasi yang baik di antara institusi terkait serta belum adanya persamaan persepsi mengenai konsep dan pengertian uji tanah dalam pemupukan berimbang di tingkat pusat, daerah maupun di tingkat petani. Diperlukan pedoman penerapan uji tanah dalam pemupukan berimbang spesifik lokasi yang disosialisasikan mulai dari tingkat pusat, daerah hingga ke tingkat petani.
3. Penelitian pengembangan uji tanah seperti studi korelasi dan kalibrasi, serta pengembangan *soil test kit* (alat uji tanah) yang dapat dikerjakan langsung di lapangan masih terbatas. Sejauh ini hanya Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat yang melaksanakannya. Diperlukan dukungan kebijakan dari atas untuk memberikan prioritas pada penelitian uji tanah terutama di lahan kering yang masih tertinggal dibandingkan lahan sawah.

PENUTUP

Adopsi teknologi untuk meningkatkan produktivitas padi di lahan sawah intensifikasi di luar Jawa perlu ditingkatkan melalui penyuluhan yang lebih proaktif serta pemberian fasilitas dari pemerintah berupa penyediaan sarana dan prasarana yang diperlukan petani untuk meningkatkan produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adimihardja, A. and J. Sri Adiningsih. 2000. Indonesia's Lowland Rice Production and Its Soil Fertility Management. International Workshop on Improving Soil Fertility Management in Southeast Asia, Bogor, Indonesia : 21-23 November 2000 (unpublished).
- Adiningsih, J.S. 1984. Pengaruh Beberapa Faktor Terhadap Penyediaan Kalium Tanah Sawah Daerah Sukabumi dan Bogor. Disertasi Doktor pada Fakultas Pasca Sarjana IPB.
- Adiningsih, J.S. 1992. Peranan Efisiensi Penggunaan Pupuk untuk Melestarikan Swasembada Pangan. Orasi Pengukuhan Ahli Peneliti Utama. Badan Litbang Pertanian, Jakarta.
- Adiningsih, J.S. dan Sri Rochayati. 1988. Peranan bahan organik dalam meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan produktivitas tanah. hlm. *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Penggunaan Pupuk, Cipayung, 16-17 November 1987. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Adiningsih, J.S., M. Sudjadi and Sri Rochayati. 1988. Organic matter management to increase fertilizer efficiency and productivity. Proceeding of the ESCAP/FAO-TCDC Regional Seminar on the Use of Recycled Organic Matter, Chengdu-China, 4-14 May, 1988.
- Adiningsih, J.S., Moersidi S., M. Sudjadi, dan A.M. Fagi. 1989. Evaluasi keperluan fosfat pada lahan sawah intensifikasi di Jawa. hlm. *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Al-Jabri, M., Soepartini, dan Didi Ardi S. 1990. Status hara Zn pada lahan sawah. hlm. 427-464 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk. Cisarua, 12-13 Nopember 1990. Puslittanak-Badan Litbang Pertanian.
- Anonim. 1998. Vademekum. Direktorat Pupuk dan Pestisida. Jakarta.
- Anonim. 2003a. Fertilizer Hand Book. Lembaga Pupuk Indonesia. Jakarta.
- Anonim. 2003b. Rumusan Diskusi Pemupukan Berimbang, Bogor 25 September 2003. Balai Penelitian Tanah, Puslitbang tanah dan Agroklimat.
- Anonim. 2003c. Laporan akhir Pengujian Efektivitas Pupuk Phonska. Kerjasama Penelitian Balai Penelitian Tanah-PT Petrokimia, Gresik. Bogor.
- Balitpa. 2004. Deskripsi Varitas Unggul Baru Padi. Dikompilasi oleh: Ooy S. Lesmana, Husin M. Toha, Irsal Las, dan B. Suprihatno. Balai Penelitian Tanaman Padi. Badan Litbang Pertanian. 68 hlm.
- BPS. 2000. Survei Pertanian, Luas Lahan Menurut Penggunaannya di Jawa.

Badan Pusat Statistik, Jakarta.

- Dennis, T. O'Brien., M. Sudjadi, and J. Prawirasumantri. 1983. Farm level evaluation of alternative forms of urea and methods of application for rice production in Java, Indonesia. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 2: 39-48.
- Dierolf, T., T. Fairhurst, and E. Mutert. 2000. Soil fertility kit: A toolkit for acid, upland soil fertility management in Southeast Asia. *Handbook Series*. 149 p.
- Dobermann, A. and T. Fairhurst. 2000. Rice: Nutrient Disorder and Nutrient Management. International Rice Research Institute – Potash & Phosphate Institute (PPI) - Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC).
- Fagi, A.M. dan S. Kartaatmadja. 2003. Teknologi budidaya padi: Perkembangan dan peluang. Makalah disajikan pada Seminar Nasional Ekonomi Padi dan Beras di Indonesia. Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian, Jakarta.
- Follet, R.P., S.C. Gupta and P.G. Hunt. 1987. Soil Conservation Practices : relation to the menegement of plant nutrient for crop production. *Soil Sci. Soc. Amer. Special Publication*. (IFRI Report, 1987), 29 p.
- Go Ban Hong. 1977. Peningkatan penggunaan pupuk nitrogen pada tanah sawah. *Kongres Nasional Ilmu Tanah II*, Yogyakarta.
- Go Ban Hong. 1977. Peranan Pupuk. Bahan Penataran Staf Peneliti LPH Tahap II. 25-28 April 1977. Departemen Ilmu-Ilmu Tanah. Faperta IPB.
- Karama, A.S., A.R. Marzuki, dan I. Manwan. 1996. Penggunaan pupuk organik pada tanaman pangan. hlm. 395-425 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Penggunaan Pupuk V. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Kyuma, K. 2004. Fundamental chemical reactions in submerged paddy soils. Pages 60-114. *In* Paddy Soil Science. Kyoto University Press and Trans Pacific Press.
- Lindsay, L.L. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley & Sons. New York.
- Moersidi S., D. Santoso, M. Soepartini, M. Al-Jabri, J. Sri Adiningsih, dan M. Sudjadi. 1989. Peta keperluan fosfat tanah sawah di Jawa dan Madura. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* No. 8 : 13-25.
- Patrick, W.H., Jr., and C.N. Reddy. 1976. Chemical changes in rice soils. Pages 361-379. *In* The International Rice Research Institute. *Soils and Rice*. Los Banos, Phillipines.
- Patrick, W.H., Jr., and D.S. Mikkelsen. 1971. Plant nutrient behaviour in flooded soil. Pages 187-215 *In* Soil Society of America. *Fertilizer tekhnology and use*. Madison, Wisconsin.

- Ponamperuma. 1965 Dynamic aspects of flooded soils Pages 295-329 in IRRI. *The mineral nutrition of rice plant*. Proc. of a symposium at IRRI, Feb. 1964. The John Hopkins Press. Baltimore. Maryland.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24 :29-96
- Prawirasumantri, J., A. Sofyan, dan M. Sudjadi. 1983. Perbandingan efisiensi tiga pupuk nitrogen untuk padi sawah IR-36 pada tanah Grumusol dan Regosol. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 2: 35-38.
- Prawirasumantri, J., A.M. Damdam, dan N. Sri Muljani. 1986. Efisiensi beberapa sumber pupuk nitrogen untuk padi sawah IR 36 pada Aeric Tropoqualf di Sukamandi. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 5: 1-5.
- Prihatini, T. dan K. Komariah. 1988. Pemanfaatan Azolla dalam budidaya padi sawah. hlm. *dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah. Cipayung, 18-20 Maret 1986. Pusat Penelitian Tanah, Bogor. Badan Litbang Pertanian.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1987. Laporan Perbandingan Beberapa Jenis Pupuk Nitrogen pada Tanaman Padi Gogo dan Jagung. Laporan Kerjasama Penelitian Pusat Penelitian Tanah dengan PT Maidah.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1990. Laporan Penelitian Perbandingan Pengaruh Pupuk Silica Coated Urea dengan pupuk Sumber Nitrogen Lainnya terhadap Produksi Tanaman Pangan pada Berbagai Jenis Tanah. Kerjasama Penelitian Pusat Penelitian Tanah dengan PT PUSRI.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1992. Peta status K tanah sawah Propinsi Jawa Barat, skala 1:250.000 edisi V. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Rochayati, S., D. Setyorini, dan J. Sri Adiningsih. 2002. Peranan uji tanah dalam meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk. Makalah disajikan pada seminar sehari "Teknologi untuk Meningkatkan Efisiensi Penggunaan Pupuk di Indonesia". BPPT. Jakarta, 6 Mei 2002.
- Santoso, D., Heryadi, Sukristiyonubowo, dan Joko Purnomo. 1990. Pemupukan belerang di lahan sawah. hlm. 241-252 *dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Penggunaan Pupuk V. Cisarua, 12-13 Nopember 1990. Puslittanak, Badan Litbang Pertanian.
- Soepartini, M. 1995. Status kalium tanah sawah dan tanggapan padi terhadap pemupukan KCl di Jawa Barat. *Pembrit. Penel. Tanah* 13: 27-40.
- Sofyan, A., D. Nursyamsi, and I. Amien. 2002. Development of soil testing in Indonesia. *Workshop Proceedings*, 21-24 January 2002. SMCRSP

Technical Bulletin 2003-01.

- Sulaeman, T. dan D. Nursyamsi. 2002. Perangkat lunak PKDSS: Suatu pengantar. Puslitbang Tanah dan Agroklimat. Bahan Workshop Pembinaan Penelitian Kalibrasi Uji Tanah Hara P dan K Lahan Kering. 12 hlm (Tidak dipublikasikan).
- Thamrin Bastari dan Aspan. 1988. Evaluasi hasil pengujian urea briket pada tanaman padi tahun 1987/1988. hlm. 37-47 *dalam* Prosiding Lokakarya Efisiensi Penggunaan Pupuk. Puslittanak, Bogor.
- Tim Studi Penghapusan Subsidi Pupuk (SPSP). 1989. Upaya efisiensi penggunaan pupuk bersubsidi (aspek Teknis). Menko Ekuin, Jakarta (Tidak dipublikasikan).
- Wetselaar, R., N. Sri Mulyani, Hadiwahjono, J. Prawirasumantri and A.M. Damdam. 1984. Deep Point-Placed Urea in a Flooded Soils. Research Result in West Java. Proceedings of Wokshop on Urea Deep-Placement Technology. AARD - IFDC.
- Widowati, L. R., dan Sri Rochayati. 2003a. Identifikasi kahat hara S, Ca, Mg, Cu, Zn dan Mn pada tanah sawah intensifikasi. Makalah diseminarkan pada Kongres HITI di Padang, 21-24 Juli 2003 (Tidak dipublikasikan).
- Widowati, L.R., A. Kencanasari, S. Widati, Maryam, dan S. Rochayati. 2003b. Evaluasi sifat kimia tanah sebagai faktor pembatas pertumbuhan padi sawah pada tanah sawah masam. hlm. 29-44 *dalam* Prosiding Simposium Nasional Pendayagunaan Tanah Masam. Bandar Lampung, 29-30 September 2003.
- Widowati, L.R., Sri Rochayati, Sutisni, D., Eviati, dan J. Sri Adiningish. 1999. Peranan Hara S, Ca, dan Mg, dan Hara Mikro dalam Penanggulangan Pelandaian Produktivitas Lahan Sawah Intensifikasi. Laporan Penelitian: Bagian Proyek Penelitian Sumberdaya Lahan dan Agroklimat. Proyek Penelitian Sumberdaya Lahan dan Agroklimat (Tidak dipublikasikan).
- Willet, I.R. 1989. Causes and prediction of changes in extractable phosphorus during flooding. *Aust. J. Soil Res.* 27: 45-54.
- Yamane. I. 1978. Electrochemical changes in rice soils. *In*. Soil and Rice. The International Rice Research Institute. Soils and Rice. Los Banos, Phillipines.

6. TEKNOLOGI PUPUK MIKROBA UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PEMUPUKAN DAN KEBERLANJUTAN SISTEM PRODUKSI PADI SAWAH

Rasti Saraswati, Tini Prihatini, dan Ratih Dewi Hastuti

Pengembangan pertanian padi sawah berwawasan lingkungan dengan pendekatan produksi dan peningkatan pendapatan petani, seyogianya dilakukan berdasarkan pada peningkatan efisiensi pemupukan, keberlanjutan produktivitas tanah dan sistem produksi pertanian.

Cara budi daya padi sawah dengan menggunakan pupuk kimia yang berlebihan dan terus-menerus perlu ditinjau kembali, khususnya untuk mengatasi kehilangan N dan kejenuhan terhadap pupuk P, karena selain tidak efisien juga mengakibatkan dampak negatif terhadap lingkungan. Pemeliharaan kesehatan dan kesuburan tanaman dengan memperhatikan aspek kesuburan dan kesehatan tanahnya merupakan hal yang paling penting dalam sistem pertanian. Kaidah-kaidah hayati yang mendukung rantai daur ulang yang terjadi di alam antara organisme produsen, konsumen dan pengurai harus dijaga keberlangsungannya. Penyediaan unsur hara dan pengendalian hama dan penyakit tanaman yang sinergis dengan kaidah hayati perlu digalakkan dan dilibatkan secara proporsional. Pemanfaatan pupuk dan pestisida hayati berdasarkan respons positif terhadap peningkatan efisiensi pemupukan dan produksi padi, dan penghematan biaya pupuk dan tenaga kerja dapat dipastikan meningkatkan pendapatan petani.

Teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi pemupukan dan keberlanjutan sistem produksi pertanian adalah "teknologi pupuk mikroba". Suplai sebagian dari hara N, P, K yang dibutuhkan oleh tanaman padi dapat dilakukan oleh bakteri rizosfir, endofitik, pupuk hijau yang mempunyai kemampuan menambat N_2 dari udara, mikroba pelarut P dapat membantu menambang P dalam tanah sehingga menjadi P-tersedia bagi tanaman, sehingga kebutuhan pupuk kimia dapat dihemat. Bahkan, belakangan dengan ditemukannya bakteri rizosfir yang mampu hidup dalam jaringan tanaman (endofitik), berfungsi memacu pertumbuhan dan melindungi tanaman inangnya merupakan hal yang lebih menjanjikan terhadap peningkatan efisiensi pemupukan.

Pengembalian bahan organik melalui percepatan perombakan jerami dengan bioaktivator perombak bahan organik tidak kalah penting untuk dilakukan dalam upaya memperbaiki struktur tanah, menyediakan hara, menekan perkecambahan spora, menonaktifkan atau menghentikan pertumbuhan patogen.

Pemanfaatan mikroba antagonis dalam mengendalikan hama dan penyakit dapat meningkatkan kesehatan tanah.

Pengelolaan sistem produksi padi sawah secara intensif dan berkelanjutan dapat dilakukan secara terpadu melalui (1) aplikasi pupuk mikroba yang berperan dalam meningkatkan efisiensi pemupukan N, P, K; (2) aplikasi bioaktivator perombak bahan organik yang berperan dalam mempercepat perombakan dan pengembalian sisa organik untuk meningkatkan kesuburan tanah; dan (3) pengendalian hama dan penyakit secara hayati dan terpadu.

KONTRIBUSI MIKROBA DALAM MENINGKATKAN KESUBURAN TANAH SAWAH

Peran dan fungsi mikroba tanah sangat menentukan berhasilnya keberlanjutan sistem produksi pertanian. Mikroba tanah bertanggungjawab pada berbagai transformasi hara dalam tanah yang berhubungan dengan kesuburan dan kesehatan tanah (Kennedy and Papendick, 1995). Mikroba penyubur tanah hidup berasosiasi dengan akar tanaman, meningkatkan ketersediaan hara, memacu pertumbuhan dan melindungi tanaman melawan patogen melalui senyawa fitohormon, antimikroba, toksin dan enzim yang dihasilkannya.

Pada tanah sawah, genangan air merupakan habitat yang cocok bagi komunitas perairan, termasuk dan eukaryotik, gulma air, mikroflora heterotrofik dan fauna, meskipun interaksi antar anggota komunitas perairan sawah masih sangat sedikit diketahui. Genangan air pada tanah sawah sangat berpengaruh terhadap proses metabolisme mikroba, sedangkan tanaman padi, termasuk akar dan rizosfir merupakan tempat beraktivitas mikroba. Aktivitas mikroba dalam tanah sawah dapat menyebabkan terjadinya perubahan fungsi biokimia tanah seperti pelarutan (solubilisasi), pengikatan (fiksasi), mineralisasi, imobilisasi, oksidasi dan reduksi, sehingga belakangan ini banyak mikroba yang dimanfaatkan untuk memperbaiki struktur tanah, seperti untuk penggemburan dan pencampuran tanah, serta perombakan bahan organik bagi perbaikan kesuburan tanah.

Berbagai manfaat yang dapat diperoleh dari penggunaan mikroba, yaitu (1) menyediakan sumber hara bagi tanaman; (2) melindungi akar dari gangguan hama dan penyakit; (3) menstimulir sistem perakaran agar berkembang sempurna memperpanjang usia akar; (4) memacu mitosis jaringan meristem pada titik tumbuh pucuk, kuncup bunga, dan stolon; (5) sebagai penawar racun beberapa logam berat; (6) sebagai metabolit pengatur tumbuh; dan (7) sebagai bioaktivator perombak bahan organik, sehingga mikroba disebut sebagai *bioregulator* (pengatur biologis) tanah.

Mikroba yang dimanfaatkan untuk meningkatkan kesuburan tanah biasa dikenal

sebagai pupuk mikroba (*microbial fertilizer*). Prinsip aplikasi pupuk mikroba pada tanah dan tanaman ialah memperbanyak populasi mikroba terpilih sehingga mampu bersaing dengan mikroba pribumi (*indigenous*). Invasi dan kolonisasi awal dari pupuk mikroba yang di introduksi dalam jumlah banyak dan bermutu unggul akan memenangkan kompetisi dengan mikroba pribumi, sehingga mempunyai kesempatan untuk membantu penyediaan hara dan pertumbuhan tanaman.

Pemanfaatan pupuk mikroba dalam membantu pertumbuhan dan perlindungan tanaman dilakukan secara langsung dan tidak langsung. Peran langsung dilakukan dengan menambat N_2 dan memacu pertumbuhan tanaman dengan menghasilkan fitohormon (asam indol asetat, sitokinin, giberelin), dan melarutkan P yang terikat menjadi tersedia melalui asam-asam organik dan enzim yang dihasilkannya. Sedangkan peran tidak langsung dilakukan dengan menghasilkan senyawa antimikroba yang mampu menekan pertumbuhan mikroba patogen. Aplikasi pupuk mikroba pada rizosfir dan tanaman merupakan sesuatu hal yang kompleks, sehingga dalam pemanfaatannya perlu metode aplikasi yang efisien dan pupuk mikroba yang bermutu.

PEMANFAATAN PUPUK MIKROBA UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PEMUPUKAN NITROGEN

Beragam jenis bakteri bertanggungjawab pada penambatan N secara hayati, mulai dari Sianobakter (ganggang hijau biru) dan bakteri fotosintetik pada air tergenang dan permukaan tanah sampai pada bakteri heterotrofik dalam tanah dan zona akar (Kyuma, 2004). Berbagai jenis bakteri penambat N_2 yang hidup-bebas (non-simbiotik) di tanah sawah tercantum dalam Tabel 1.

Bakteri penambat N_2 di tanah sawah

Bakteri penambat N_2 yang bersifat aerob dan anaerob fakultatif, heterotrof dan fototrof pada tanah sawah turut berkontribusi terhadap ketersediaan N bagi tanaman. Bakteri heterotrof dominan pada zona perakaran. Bakteri penambat N_2 di daerah perakaran dan bagian dalam jaringan tanaman padi, yaitu *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Azospirillum* dan *Herbaspirillum* telah terbukti mampu meningkatkan secara nyata penambatan N_2 (James and Olivares, 1997).

Ditinjau dari aspek ekologi, bakteri penambat N_2 yang mengkolonisasi tanaman gramineae (rumput-rumputan) dapat dikelompokkan menjadi tiga golongan yaitu: (a) bakteri rizosfer penambat N_2 (diazotrof) (heterotrofik dan fototrofik); (b) bakteri diazotrof endofitik fakultatif; dan (c) bakteri diazotrof endofitik obligat.

Tabel 1. Berbagai jenis bakteri penambat N_2 yang hidup-bebas (non-simbiosis)

pada tanah sawah (Kyuma, 2004)

Bacteria	
1. Photosynthetic bacteria	
<i>Rhodospirillaceae</i>	<i>Rhodospirillum</i> , <i>Rhodopseudomonas</i> , <i>Rhodomicrobium</i>
<i>Chromatiaceae</i>	<i>Chromatium</i> , <i>Ectothiorhodospira</i> , <i>Triospirillum</i>
<i>Chlorobiaceae</i>	<i>Chlorobium</i> , <i>Chloropseudomonas</i>
2. Gram-negative aerobic bacteria	
<i>Azotobacteriaceae</i>	<i>Azotobacter</i> , <i>Azotomonas</i> , <i>Beijerinckia</i> , <i>Dexia</i>
<i>Pseudomonadeceae</i>	<i>Pseudomonas</i> (<i>P. azotogensis</i>)
3. Gram-negative facultative anaerobic bacteria	
<i>Enterobacteriaceae</i>	<i>Klebsiella</i> (<i>K. pneumoniae</i>), <i>Enterobacter</i> (<i>E. cloecae</i>), <i>Escherichia</i> (<i>E. intermedia</i>), <i>Flavobacterium</i> sp.
4. Gram-negative anaerobic bacteria	
	<i>Desulfovibrio</i> (<i>D. vulgaris</i> , <i>D. desulfuricans</i>)
5. Methane forming bacteria	
<i>Methanobacteriaceae</i>	<i>Methanobacterium</i> , <i>Methanobacillus</i>
6. Spore-forming bacteria	
<i>Bacillaceae</i>	<i>Bacillus</i> (<i>B. polymyxa</i> , <i>B. macerans</i> , <i>B.</i> <i>circulans</i>), <i>Clostridium</i> (<i>C. pasteurianum</i> , <i>C. butyricum</i>), <i>Desulfotomaculum</i> sp.
7. Bacteria analogous to Actinomycetes	
<i>Mycobacteriaceae</i>	<i>Mycobacterium</i> (<i>M. flavum</i>)
Ganggang hijau biru	
1. Heterocyst-forming blue-green algae	
<i>Nostocaceae</i>	<i>Anabaena</i> , <i>Anabaenopsis</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Aulosira</i> , <i>Chlorogloopsis</i> , <i>Cylindrospermum</i> , <i>Nostoc</i>
<i>Stigonemataceae</i>	<i>Hapalosiphon</i> , <i>Mustigocladus</i> , <i>Stigonema</i>
<i>Scytonemataceae</i>	<i>Microchaete</i> , <i>Scytonema</i> , <i>Tolypotrix</i>
<i>Rivulariaceae</i>	<i>Calothrix</i>
2. Non-heterocyst-forming blue-green algae	
<i>Chloococcaceae</i>	<i>Anacystis</i> , <i>Aphanothece</i> , <i>Gloecapsa</i> , <i>Gloeothece</i> , <i>Microcystis</i>
<i>Eentophysalidaceae</i>	<i>Chlorogloea</i>
<i>Oscillatoriaceae</i>	<i>Lyngbya</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Phormidium</i> , <i>Trichodesmium</i>
<i>Scytonemataceae</i>	<i>Plectonema</i>

Bakteri rizosfir diazotrof heterotrofik. Bakteri penambat N₂ pada rizosfer tanaman gramineae, seperti *Azotobacter paspali* dan *Beijerinckia* spp. termasuk salah satu dari kelompok bakteri aerobik yang mengkolonisasi permukaan akar (Baldani *et al.*, 1997). *Azotobacter* merupakan bakteri penambat N₂ yang mampu menghasilkan substansi zat pemacu tumbuh giberelin, sitokinin, dan asam indolasetat, sehingga pemanfaatannya dapat memacu pertumbuhan akar (Alexander,

1977). Populasi *Azotobacter* dalam tanah dipengaruhi oleh pemupukan dan jenis tanaman.

Bakteri rizosfir diazotrof fototrofik. Kelompok prokaryotik fotosintetik terbesar dan menyebar secara luas yaitu Sianobakter (Albrecht, 1998). Kemampuannya menambat N_2 mempunyai implikasi untuk mempertahankan kesuburan ekosistem pada kondisi alami lahan pertanian. Sianobakter dan bakteri fotosintetik hidup dominan pada air mengalir di permukaan tanah. Sianobakter yang membentuk spora dapat bertahan hidup lama pada keadaan kering sehingga populasi pada akhir musim kering menjadi melimpah. Pertumbuhan Sianobakter dalam tanah meningkatkan pembentukan agregat sehingga mempengaruhi laju infiltrasi, aerasi dan suhu tanah. Belum ada informasi mengenai eksudat N yang dihasilkan oleh Sianobakter.

Kehadiran Sianobakter sangat tergantung pada pH dan ketersediaan P tanah. suhu perairan yang optimum bagi pertumbuhan Sianobakter yaitu sekitar 30°-35°C. Pada musim hujan, kurangnya sinar dan air hujan akan membatasi pertumbuhan Sianobakter. Sianobakter mengasimilasi P lebih banyak daripada yang diperlukan untuk hidupnya, dan menyimpannya dalam bentuk polyphosphat yang akan digunakan pada waktu kondisi kekurangan P (Roger and Kulasooriya, 1980). Fotosintesis dapat meningkatkan pH air sawah maka selama masa pertumbuhan, kebanyakan dari N yang dilepas akan dimobilisasi kembali atau akan hilang melalui penguapan dalam bentuk NH_3 , sehingga N yang berasal dari Sianobakter akan menjadi bentuk tersedia bagi tanaman melalui proses mineralisasi setelah ganggang mati. Besarnya sumbangan Sianobakter terhadap kebutuhan N tanaman ditentukan oleh besarnya biomassa, masa antara dua musim tanam, laju penambatan N_2 , dan besarnya N tanah yang tersedia bagi tanaman. Potensi N yang disumbangkan oleh bakteri penambat nitrogen yang hidup-bebas tidak terlalu tinggi, karena N yang berhasil ditambat berada di luar jaringan tanaman, sehingga sebagian hilang sebelum diserap oleh tanaman (Ladha *et al.* 1997).

Bakteri diazotrof endofitik fakultatif. Pada umumnya bakteri diazotrof endofitik tidak menyebabkan penyakit, berproliferasi di dalam jaringan, tetapi tidak membentuk endosimbion di dalam sel tanaman yang hidup. Bakteri diazotrof endofitik biasanya hidup di dalam ruang interseluler atau pembuluh xilem akar, batang, daun, dan permukaan biji (James *et al.*, 2000). Potensi N yang disumbangkan oleh bakteri diazotrof endofitik lebih besar dari diazotrof non-endofitik, karena N yang berhasil ditambat tidak ada yang hilang. Kolonisasi bakteri diazotrof endofitik dalam jaringan tanaman dapat mengeksploitasi substrat karbon yang disuplai oleh tanaman tanpa berkompetisi dengan mikroba lain. Bakteri ini seringkali berlokasi dalam akar di bawah tanah atau berada pada jaringan yang kompak, seperti buku batang dan pembuluh xilem, sehingga bakteri ini mampu tumbuh pada lingkungan dengan tekanan O_2 yang rendah yang sangat

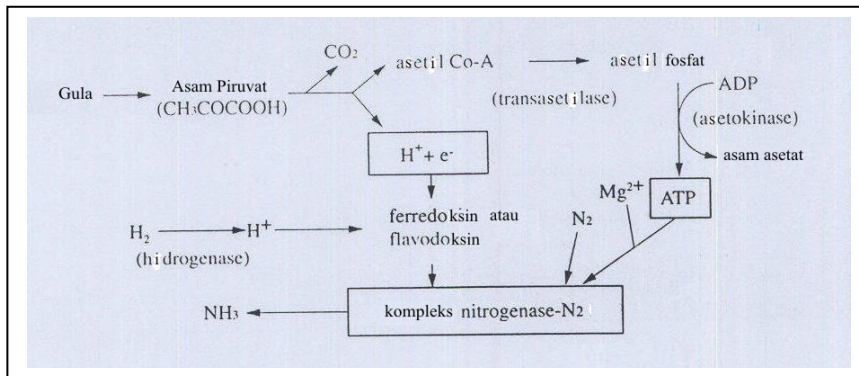
penting bagi aktivitas enzim nitrogenase (James dan Oliver, 1997). Beberapa bakteri diazotrof endofitik selain mampu menambat N_2 juga mampu mensekresikan asam indol-3-asetat (Ladha *et al.*, 1997).

Bakteri diazotrof endofitik fakultatif yang merupakan simbiosis pada tanaman *Azolla* yaitu *Anabaena azollae*. Bakteri ini tidak pernah dijumpai hidup bebas, tetapi selalu dijumpai sebagai endofit yang terdapat di dalam rongga atau celah daun *Azolla*. Penambatan nitrogen terjadi pada sel *heterocysts* *Azolla*, yaitu sel yang berasal dari sel vegetatif yang berubah bentuk menjadi sel yang berdinding tebal, yang tersebar secara teratur di sepanjang filamen.

Dalam pertumbuhannya, *Azolla* mutlak membutuhkan hara P, karena proses penambatan N_2 dari udara banyak memerlukan tenaga dalam bentuk ATP. Selain hara P, faktor lain yang mempengaruhi pertumbuhan *Azolla* adalah pH, kelembapan udara, salinitas, cahaya matahari dan temperatur. Kemasaman tanah di sekitar netral adalah sangat baik untuk pertumbuhannya. Kelembapan relatif yang optimum adalah antara 85-90%. Untuk pertumbuhan yang baik kandungan garam dalam air tidak melebihi 0,1% (Anonymous, 1978). Pengaruh suhu terhadap pertumbuhan *Azolla* berbeda-beda untuk tiap jenisnya. Dari penelitian di IRRI terbukti bahwa suhu di atas 22°C menyebabkan perubahan warna serta ukuran daun tetapi tidak terhadap berat serta kandungan N tanaman. Bila suhu di atas 31°C, selain mempengaruhi warna juga mempengaruhi pertumbuhannya. Cahaya matahari yang baik untuk pertumbuhannya adalah sekitar 20.000–50.000 lux. *Azolla* yang tumbuh di bawah naungan, menunjukkan pertumbuhan yang segar dan daun berwarna hijau. Peningkatan takaran pupuk P dan intensitas cahaya sampai 33.83 klux meningkatkan bobot kering tanaman dan aktivitas penambatan N_2 .

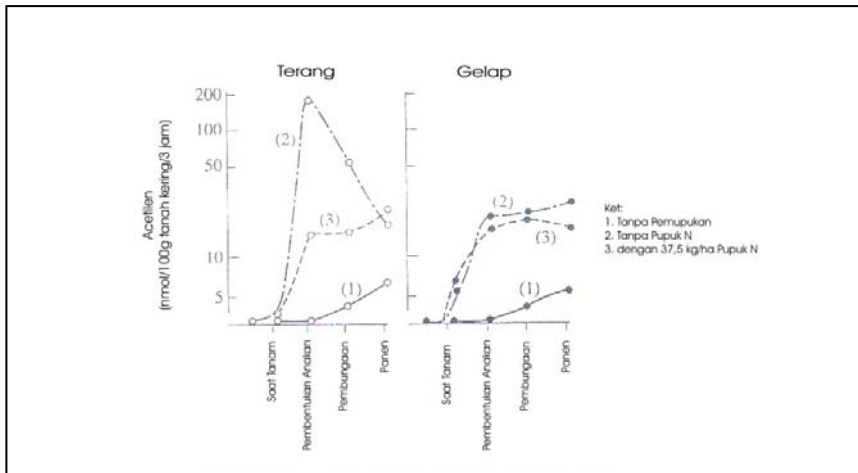
Bakteri diazotrof endofitik obligat. Bakteri diazotrof endofitik obligat hanya mengkolonisasi bagian dalam akar dan bagian luar (*aerial part*) tanaman, dan hanya dapat diisolasi dari tanaman inang. Bakteri yang tergolong kelompok ini ialah *Herbaspirillum seropedicae*, *Acetobacter diazotrophicus*, *Azoarcus* sp., *Burkholderia* sp. (Baldani *et al.*, 1997). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Herbaspirillum* yang diinokulasikan pada benih padi dalam larutan Hoagland yang mengandung ^{15}N -label dapat meningkatkan 40% total nitrogen tanaman. Infeksi *Herbaspirillum* spp. pada biji tanaman padi terjadi melalui akar dan stomata kemudian ditranslokasikan melalui xilem ke seluruh bagian tanaman.

Proses biokimia penambatan N_2 secara skema tertera pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema siklus penambatan N_2 (Nakamura, 1970; Eady & Postgate, 1974)

Enzim nitrogenase yang terdiri dari protein Fe dan MoFe mengubah N_2 menjadi NH_4^+ , selanjutnya diabsorpsi menjadi senyawa organik di dalam akar, dan NO_3^- yang lebih mobil pada xilem dan diakumulasi di vakuola akar, tajuk dan organ penyimpanan untuk menjaga keseimbangan kation-anion osmoregulasi. Penambatan N_2 oleh mikroba dapat terhambat bila pemberian N mineral berlebih. Menurut Matsuguchi *et al.* (1977) pemberian $37,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$ pada tanah sawah di Thailand, dapat menurunkan aktivitas reduksi asetilen mikroba fotosintetik (Gambar 2). Hambatan terhadap penambatan N_2 lebih disebabkan



Gambar 2. Pengaruh aplikasi pupuk N terhadap aktivitas reduksi asetilen pada tanah sawah di Thailand (0-2 cm) lapisan bajak). (Matsuguchi *et al.*,1977).

oleh NH_4^+ daripada NO_3^- atau NO_2^- bagi Azotobacter dan Sianobakter, karena NH_4^+ menghambat sintesis nitrogenase (Yoshida, 1973). Pemupukan N secara disebar seperti yang dilakukan petani umumnya, tidak hanya menekan penambatan N_2 , tetapi juga menyebabkan hilangnya N melalui volatilisasi. Pupuk mikroba endofitik merupakan cara yang dapat dipertimbangkan.

Pengaruh penambatan N secara hayati terhadap peningkatan ketersediaan N tanah

Pertanian padi sawah sangat tergantung pada ketersediaan N dalam tanah. Sepanjang periode pertumbuhan, tanaman memerlukan unsur N, namun yang paling banyak diperlukan antara awal sampai pertengahan pembentukan anakan (*midtillering*) dan tahap awal pembentukan malai. Suplai nitrogen selama proses pemasakan diperlukan untuk menunda gugurnya daun, memelihara fotosintesis selama pengisian biji dan meningkatkan kadar protein dalam biji (Dobermann and Fairhurst, 2000).

Kebutuhan N padi sawah dapat dipenuhi dari N yang berasal dari tanah, pupuk, dan air irigasi. Dari pupuk urea yang diberikan pada padi sawah beririgasi ternyata hanya 29-45% yang ditemukan kembali di dalam tanaman, dan lebih dari 50-70% pupuk N yang diberikan hilang karena pencucian dan aliran permukaan, denitrifikasi dan volatilisasi amonia yang berpotensi memproduksi gas NO_2 , dan fiksasi oleh mineral sehingga tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman (Stoltzfus *et al.* 1997). Hal ini menunjukkan rendahnya efisiensi penggunaan pupuk N.

Salah satu pendekatan untuk mengatasi kehilangan N sebagai penghematan dalam pemakaian pupuk anorganik, yakni meningkatkan efisiensi penggunaan N tersedia dalam tanah melalui penambatan N_2 , baik secara

langsung atau interaksi dengan bakteri penambat N_2 (Reddy *et al.* 1997). Pemanfaatan bakteri penambat N_2 , baik yang diaplikasikan melalui tanah maupun disemprotkan pada tanaman mampu meningkatkan efisiensi pemupukan N.

Dalam upaya mencapai tujuan akhir strategi jangka panjang, penggunaan bakteri penambat N_2 berpotensi meningkatkan produksi dan pendapatan usahatani padi. Penambatan N pada lahan sawah seperti dipublikasikan sebelum tahun 1980, rata-rata 27 kg ha⁻¹. Menurut Quispel (1974), jumlah total N yang ditambat pada lahan sawah sedunia dapat mencapai 4 juta t tahun⁻¹, yang mana 30 kg N ha⁻¹ adalah hasil penambatan N_2 yang kurang lebih setara dengan 11% dari pupuk N yang diaplikasikan setiap tahunnya pada semua jenis tanaman di dunia pada saat itu. Berdasarkan analisis N pada permukaan tanah, penambatan N_2 dalam lahan sawah mencapai 25-35 kg N ha⁻¹ tahun⁻¹ (Ono and Koga, 1984), sedangkan menurut Ito (1977), berdasarkan studi keseimbangan N selama lebih dari 70 tahun diperoleh rata-rata pengkayaan N pada permukaan tanah 38,5 kg N ha⁻¹ tahun⁻¹ pada plot tanpa pemupukan, dan 39,6 kg N ha⁻¹ tahun⁻¹ pada plot yang di kapur. Roger and Ladha (1992) mengemukakan bahwa kandungan N pada lahan sawah irigasi, 80-110 kg N ha⁻¹ diperoleh dari penambatan N_2 , air irigasi dan presipitasi, sedangkan 10-20 kg N ha⁻¹ tertinggal di akar pada biji dan jerami.

Pemanfaatan Sianobakter di lahan sawah memerlukan pertimbangan beberapa aspek teknis agronomis yaitu (1) Sianobakter terdapat dimana-mana di dalam tanah; (2) pertumbuhannya di dalam tanah sangat dibatasi oleh rendahnya pH dan kandungan P, adanya musuh alami/pemangsa dan penyebaran pupuk N; (3) strain non-indigenous yang diinokulasikan pada berbagai tanah jarang dapat berkembang dengan sendirinya; dan (4) strain indigenous sering lebih banyak dari pada strain yang diintroduksi. Kenyataan tersebut menyimpulkan lebih banyak perhatian terhadap praktek-praktek budi daya untuk memperbaiki faktor-faktor yang membatasi pertumbuhan dan penambatan N dengan penggunaan strain-strain yang telah beradaptasi dengan lingkungan. Upaya yang biasa dilakukan untuk meningkatkan pertumbuhan Sianobakter yaitu pengapuran pada lahan masam, pemberian pupuk P, pengendalian terhadap hewan pemangsa, dan pemberian pupuk N secara pembenaman dalam (Roger and Watanabe, 1986). Adanya Sianobakter pada lahan sawah tidak berarti bahwa inokulasi tidak diperlukan. Inokulasi dengan strain yang diinginkan akan lebih berguna, karena

adanya akumulasi P oleh propagul inokulum akan memberikan keuntungan awal dibandingkan propagul dari strain indigenous yang biasanya kahat P.

Keberhasilan pemanfaatan Sianobakter tergantung pada kemampuan strain yang diintroduksi untuk bertahan hidup, dan berkembang biak pada tanah secara cepat, sehingga sangat diperlukan strain yang cepat tumbuh sebagai bahan inokulum. Di India, Birma, Mesir, dan China, inokulum Sianobakter diperbanyak dalam kolam terbuka dan dangkal dengan menginokulasikan biakan pemula (*starter*) yang merupakan strain majemuk berupa mikroplot berukuran 5 – 15 cm yang mengandung 4 kg tanah⁻¹ m², 100 g superphosphate, dan insektisida. Bila diperlukan ditambah kapur untuk mencapai pH tanah 7,0 –7,5. Dalam 1 –3 minggu, pertumbuhan Sianobakter akan menutupi permukaan kolam, lalu dibiarkan kering, dan kemudian serpihannya digunakan pada pertanaman padi sawah dengan takaran 10 kg ha⁻¹ (Venkataraman, 1979). Dalam kondisi yang menguntungkan, Sianobakter dapat menambat N₂ sekitar 20-40 kg N ha⁻¹ musim⁻¹ tanam (Roger and Watanabe, 1986). Berdasarkan data yang diperoleh dari keseimbangan N menunjukkan bahwa indigenous Sianobakter mengkontribusi rata-rata 30 kg N ha⁻¹ musim⁻¹ tanam dan bila diinokulasi ke rizosfir akan menghasilkan rata-rata 337 kg N ha⁻¹ (Roger and Ladha, 1992).

Pemanfaatan tanaman penambat N₂ sebagai pupuk hijau pada padi sawah

Salah satu pendekatan alternatif pemanfaatan bakteri diazotrof hidup-bebas adalah penggunaan pupuk hijau tanaman penambat N₂, seperti *Sesbania rostrata*, *Aeschynomene*, dan *Azolla pinata* sebagai penyumbang N yang tinggi pada lahan sawah (Ladha and Reddy, 1995).

Teknologi pengelolaan sawah dengan penanaman tanaman *Sesbania* dilakukan untuk memperoleh sebagian N yang dibutuhkan melalui hubungan simbiotik dengan rhizobia. Tanaman ini beradaptasi baik pada lahan sawah, mampu tumbuh cepat dan tahan kondisi tergenang, serta mampu menambat N₂ melalui bintil batang seperti halnya bintil akar (Saraswati *et al.*, 1992; Matoh *et al.*, 1992). *S. Rostrata* mampu menghasilkan biomassa kering 16.8 t ha⁻¹ selama 13 minggu dan mengandung 426 kg N ha⁻¹; 75% N dan >60% P diakumulasi pada daun. Pemberian hijauan *S. Rostrata* setara 45 kg N ha⁻¹ dengan kombinasi pupuk N sebanyak 60 kg N ha⁻¹ dapat meningkatkan hasil padi sebesar 24% (Tabel 2).

Tabel 2. Pengaruh pupuk N dan *S. Rostrata* pada padi sawah di Vertisol Jawa Timur (Adiningsih dan Rochayati, 1988)

Perlakuan pupuk N	Takaran pupuk		Hasil
	P ₂ O ₅	K ₂ O	
kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹		t ha ⁻¹
60	45	30	3,7
60 + SR 45	45	30	4,6
120	45	30	4,1
LSD 0,05			0,6

Teknologi pengelolaan lahan sawah dengan *Azolla* terdiri atas tiga tahapan yaitu, (1) mempertahankan tersedianya inokulum di antara dua waktu tanam; (2) penanaman untuk memperoleh jumlah yang diperlukan di lapangan; dan (3) penggunaan secara agronomis sebagai pupuk hijau. Ketiga tahapan ini diawali dengan seleksi terhadap tersedianya plasma nutfah *Azolla*.

Ada tiga macam sistem bertanam *Azolla*:

1. Penanaman secara tunggal yang kemudian ditanamkan ke dalam tanah sebelum tanam. Variasi dari metode ini adalah menanam *Azolla* kemudian membenamkannya dalam bentuk kering. Tetapi pada cara ini, proses mineralisasi berjalan lambat dan *input* N hanya setengah dari *Azolla* segar.
2. Penanaman *Azolla* sebagai tanaman penutup tanah, dimana *Azolla* akan membusuk secara alami.
3. Kombinasi antara *monocropping* dengan *intercropping*. Dengan sistem ini memungkinkan N dalam keadaan selalu tersedia bagi tanaman padi, tetapi diperlukan lebih banyak tenaga kerja.

Laju pembusukan *Azolla* dapat secara nyata mempengaruhi pertumbuhan tanaman padi. Ketebalan dari hamparan *Azolla* harus dipertimbangkan karena akan mempengaruhi suhu serta nilai C/N rasio. Waktu serta metode pembedaan ke dalam tanah juga mempengaruhi efektivitas *Azolla* sebagai pupuk hijau.

Pemeliharaan *Azolla* di antara musim tanam merupakan masalah penting bagi petani, sehingga biasanya dibibitkan di rumah kaca, di kolam atau di lapangan. *Azolla* segar yang dipelihara tergantung pada musim dan sistem bertanam setempat. Masalah yang dihadapi untuk tetap memelihara

Azolla sebagai bibit dalam bentuk vegetatif dapat teratasi bila sejumlah spora dapat dihasilkan. Perkecambahan spora bersifat lambat, dan ini akan bertentangan dengan jadwal tanam. Pada umumnya untuk memelihara *Azolla* agar tumbuh cepat diperlukan tambahan hara P yang diberikan secara split. Pemeliharaan *Azolla* memerlukan pengelolaan yang terkoordinasi untuk memperoleh inokulum di lahan sawah secara cepat. Kerapatan yang rendah akan memberikan peluang untuk tumbuhnya tanaman pengganggu. Jumlah inokulum yang diperlukan bervariasi dari 300- 500 kg dan 2- 5 t ha⁻¹ berat basah. Di China, perkecambahan dan pematangan spora memerlukan waktu sedikitnya 1 bulan. Di Philippina, spora yang tertinggal di lapangan, perlu waktu 40- 60 hari untuk bertunas (Roger and Ladha, 1992). Di Vietnam, petani menggunakan metode *half saturation*. Pertama kali *Azolla* ditanam pada areal tertentu yang dibagi menjadi beberapa bagian. Bila satu bagian telah tertutup rapat oleh pertumbuhan *Azolla*, setengah dari biomasnya dipindahkan ke bagian yang baru. Proses tersebut dilakukan berulang-ulang sampai semua permukaan lahan tertutup rapat oleh hamparan *Azolla*. Alternatif cara lain yaitu dengan cara membenamkan sebagian dari *Azolla* yang dipanen (Roger and Ladha, 1992). *Azolla* segar sebanyak 20 t ha⁻¹ yang dibenamkan dalam lahan sawah sebelum tanam padi berkhasiat sama dengan pemberian 60 kg N dari Urea (Prihatini *et al.*, 1980). Namun, mengingat untuk menghasilkan *Azolla* 20 t ha⁻¹ musim⁻¹ tanam sangat memberatkan petani, karena keterbatasan luasan lahan dan waktu yang dimiliki, maka *Azolla* ditanam secara bersamaan dengan tanaman padi. *Azolla* segar yang dihasilkan dengan cara ini dapat mencapai 1,25 t ha⁻¹ dengan hasil padi mendekati pemupukan N sebanyak 150 kg urea ha⁻¹. *Azolla* dapat mensubstitusi sebagian besar kebutuhan N tanaman, meningkatkan KTK serta kandungan bahan organik tanah (Tabel 3).

Tabel 3. Pengaruh *Azolla* sp. terhadap hasil padi sawah, KTK, dan kandungan C-organik pada Inceptisol Jawa Barat (Prihatini dan Komariah, 1988)

Perlakuan	Hasil padi	KTK Me tanah	C-organik
	t ha ⁻¹	100 g ⁻¹	%
N-urea (150 kg ha ⁻¹)	4,3	13,3	2,8
<i>A. microphylla</i> .	3	27,3	5,6

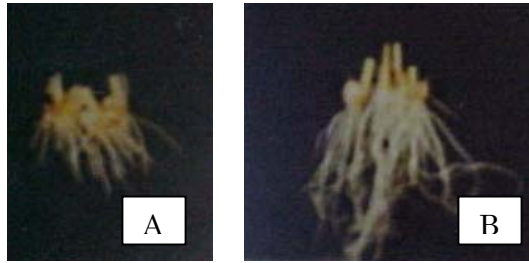
<i>A. pinnata</i>	3,8	24,4	5,7
<i>A. microphylla</i> + <i>A. pinnata</i>	33	22,5	5,5

Pemanfaatan *Azolla* sangat memerlukan pertimbangan tersedianya pupuk P, tenaga kerja dan pemberantasan hama penyakit. Lahan sawah yang berada di daerah dimana *Azolla* mudah ditanam dan terdapat deposit fosfat adalah kondusif untuk pemanfaatan *Azolla*. Perhitungan secara ekonomis perlu dipertimbangkan terhadap keuntungan jangka panjang dari penggunaan *Azolla* sebagai pupuk organik, seiring dengan meningkatnya kandungan bahan organik dan kesuburan tanah yang kemudian dibandingkan dengan harga pupuk N komersial. Menurut Ladha *et al.* (1997) petani enggan menggunakan pupuk hijau karena secara ekonomi tidak lebih menguntungkan dibandingkan dengan penggunaan pupuk N komersial.

Peneliti-peneliti di Philippina, Thailand dan China telah mendapatkan jenis-jenis hibrida baru dan telah memahami mekanisme untuk menginduksi pembentukan spora. Inovasi baru diperlukan untuk mencari varietas-varietas baru yang bersifat toleran terhadap kondisi tercekam baik tanaman *Azolla* sebagai tanaman inang juga *Anabaena azollae* sebagai simbion (Roger and Ladha, 1992).

PEMANFAATAN PUPUK MIKROBA PEMACU TUMBUH UNTUK MENINGKATKAN PERTUMBUHAN TANAMAN PADI

Pertumbuhan tanaman merupakan proses yang dinamis dan kompleks dikendalikan oleh suatu substansi pemacu tumbuh tanaman (fitohormon) yang ditranslokasikan dalam jaringan tanaman mempengaruhi pertumbuhan, diferensiasi jaringan dan organ (Wareing and Phillips, 1978). Salah satu keuntungan pemanfaatan bakteri rizosfir dan endofitik penambat N₂ yaitu dihasilkannya substansi zat pemacu tumbuh (Alexander, 1977). *Acetobacter diazotrophicus* dan *Herbaspirillum seropedicae* mampu memproduksi asam indol-3-asetat (AIA) yang berperan memacu pemanjangan sel, pembelahan sel, dominansi apikal, inisiasi akar, diferensiasi jaringan vaskuler, dan biosintesa etilen (Chasan, 1993; Bastian *et al.*, 1998). Substansi yang dihasilkan oleh campuran bakteri penambat N₂ dapat memacu pertumbuhan akar tanaman padi (Saraswati *et al.*, 1992).



Gambar 3. Pertumbuhan akar padi pada medium agar-air 1% yang mengandung bahan ekskresi campuran bakteri penambat N₂ (*Rhizobium* dan *Rhodopseudomonas*). A. Kontrol (tanpa bahan ekskresi mikroba). B. Dengan bahan ekskresi mikroba. (Sumber: Saraswati *et al.*, (1992) tidak dipublikasi)

Bakteri diazotrof yang berasosiasi dengan tanaman padi melalui penambatan N₂ dapat memperbaiki nutrisi N, produksi fitohormon, merubah morfologi dan fisiologi akar, sehingga meningkatkan biomassa akar dan lebih banyak mengeksplorasi volume tanah, meningkatkan serapan hara, pertumbuhan dan produksi tanaman (Bastian *et al.*, 1998). *Azospirillum* merupakan bakteri penambat N₂ dan pemacu tumbuh tanaman yang hidup bebas mengkolonisasi permukaan luar dan dalam akar tanaman padi, jagung, tebu, dan rumputan lainnya. Jenis yang tergolong kelompok ini adalah *Azospirillum lipoferum*, *A. amazonense*, *A. brasilense* dan *A. irakense* (Baldani *et al.*, 1997). Konsentrasi asam indol asetat dan asam indol butirat, respirasi, aktivitas enzim metabolisme di daerah perakaran menyebabkan meningkatnya serapan hara dalam tanaman (Fallik *et al.* 1988), jumlah rambut akar tanaman sereal sebesar 15-20% (Okon *et al.*, 1989), dan luas permukaan akar (Dobereiner and Pedrose, 1987).

PEMANFAATAN PUPUK MIKROBA PELARUT FOSFAT UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PEMUPUKAN P

Pada kebanyakan lahan sawah di Pulau Jawa terjadi akumulasi unsur P karena pemupukan yang terus-menerus, padahal unsur P tersebut tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman karena terikat dengan mineral tanah. Untuk meningkatkan ketersediaan P, baik dari tanah maupun dari pupuk diperlukan mikroba yang mampu melarutkan P dan mendorong penyerapan P oleh tanaman.

Berbagai jenis mikroba pelarut fosfat, seperti *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Penicillium*, *Sclerotium*, *Fusarium*, dan *Aspergillus* berpotensi tinggi dalam melarutkan fosfat terikat menjadi fosfat tersedia dalam tanah (Alexander, 1977; Illmer and Schinner, 1992; Goenadi *et al.* 1993; Goenadi

dan Saraswati, 1993). Mekanisme pelarutan fosfat dari bahan yang sukar larut oleh aktivitas mikroba banyak dikaitkan dengan aktivitas mikroba bersangkutan dalam menghasilkan enzim fosfatase, fitase (Alexander, 1977) dan asam-asam organik hasil metabolisme seperti asetat, propionat, glikolat, fumarat, oksalat, suksinat, tartrat (Banik and Dey, 1982), sitrat, laktat, dan ketoglutarat (Illmer and Schinner, 1992). Menurut Alexander (1977), mekanisme pelarutan fosfat yang terikat dengan Fe (*ferric phosphate*) pada tanah sawah terjadi melalui peristiwa reduksi sehingga Fe dan fosfat menjadi tersedia bagi tanaman. Proses utama pelarutan senyawa fosfat sukar larut karena adanya produksi asam organik dan sebagian asam anorganik oleh mikroba yang dapat berinteraksi dengan senyawa fosfat sukar larut dari kompleks Al-, Fe-, Mn-, dan Ca- (Basyaruddin, 1982).

Pupuk mikroba pelarut fosfat berhasil meningkatkan ketersediaan P baik dari dalam tanah maupun pupuk. Hasil demonstrasi plot di 12 lokasi transmigrasi di Lambale, Kabupaten Muna, Provinsi Sulawesi Tenggara seluas 10 ha menunjukkan bahwa pemberian pupuk mikroba pelarut fosfat dengan takaran pemupukan pola bantuan (Urea 100 kg ha⁻¹; SP-36 50 kg ha⁻¹; dan KCl 50 kg ha⁻¹) cenderung hanya meningkatkan hasil padi sebesar 4%, dari 3,31 menjadi 3,44 t ha⁻¹, sedangkan pemberian pupuk mikroba pelarut fosfat dengan pemupukan setengah takaran pola bantuan (Urea 50 kg ha⁻¹; SP-36 25 kg ha⁻¹; dan KCl 25 kg ha⁻¹) dapat meningkatkan hasil padi sebesar 16% dari 2,67 menjadi 3,10 t ha⁻¹ (Tabel 4). Pengaruh pupuk mikroba pelarut fosfat pada padi sawah (200g 20kg benih⁻¹) di kebun percobaan muara, Bogor (MK 1998) dapat menekan kebutuhan pupuk NPK sampai dengan 75% dari takaran anjuran (Tabel 5).

Tabel 4. Pengaruh pupuk mikroba pelarut fosfat pada padi sawah di 12 lokasi transmigrasi di Lambale, Sulawesi Selatan. MT. 1998. (Saraswati dkk., 1998, tidak dipublikasi)

Pemupukan Urea	Pemupukan SP-36	Pemupukan KCl	pupuk mikroba pelarut fosfat	Hasil padi
Kg ha ⁻¹			g ha ⁻¹	t ha ⁻¹
-	-	-	-	1,90
-	-	-	200	2,72
50	25	25	-	2,67
50	25	25	200	3,10
100	50	50	200	3,44
100	50	50	-	3,31

* Takaran rekomendasi

Tabel 5. Pengaruh pupuk mikroba pelarut fosfat pada hasil padi sawah di Kebun Percobaan. Muara, Bogor (Saraswati dkk. (1998, tidak dipublikasi)

Perlakuan	Bobot 100 butir	Hasil gabah kering
	g ha ⁻¹	t ha ⁻¹
100% takaran standar NPK	2,81	5,78
75% takaran standar NPK + pupuk mikroba pelarut fosfat	2,75	6,00
50% takaran standar NPK + pupuk mikroba pelarut fosfat	2,84	5,65
25% takaran standar NPK + pupuk mikroba pelarut fosfat	2,80	5,13

Penggunaan pupuk mikroba pelarut fosfat yang mampu meningkatkan kelarutan P merupakan suatu pemecahan masalah peningkatan efisiensi pemupukan P yang aman lingkungan.

PEMANFAATAN BIOAKTIVATOR PEROMBAK JERAMI PADI

Penambahan jerami di tanah sawah merupakan cara termudah untuk memelihara atau meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Perombakan jerami merupakan hal yang sangat penting untuk menghindari imobilisasi N tanah dan kemungkinan terbentuknya alelopati dan penyakit tanaman. Penambahan jerami yang telah dikomposkan dengan pupuk mikroba perombak bahan organik merupakan strategi yang baik untuk melindungi dan meningkatkan kualitas tanah. Untuk meningkatkan aktivitas perombakan jerami dengan cepat diperlukan introduksi bioaktivator perombak bahan organik yang mampu berkompetisi dengan patogen tanah. Mikroba perombak bahan organik bertanggungjawab atas proses perombakan bahan organik, pembentukan humus, dan siklus hara yang secara agronomis sangat penting dalam meningkatkan ketersediaan hara dalam tanah.

Hasil penelitian Saraswati dkk. (2001) menunjukkan bahwa pemberian mikroba perombak bahan organik dapat mempercepat proses pengomposan (Tabel 6). Secara alamiah, perombakan jerami memakan waktu sampai 1 (satu) bulan namun dengan inokulasi perombak bahan organik, C/N rasio jerami dapat mencapai 16.85 dalam waktu 12 hari, Dengan mempercepat waktu pengomposan diharapkan petani dapat memperoleh keuntungan dari percepatan waktu tanam. Pemberian jerami yang dikomposkan dengan mikroba perombak bahan organik, pupuk mikroba pelarut fosfat dan Zn mampu meningkatkan bobot beras sekitar 26%– 36% (Tabel 7).

Tabel 6. Pengaruh mikroba perombak bahan organik terhadap kecepatan penurunan C/N rasio jerami (Saraswati dkk. 2001, tidak dipublikasi)

Hari ke-	Suhu (0° C)	C/N ratio
0	28.0	70.00
6	30.0	21.77
12	32.8	16.85
18	30.5	13.41
24	30.0	11.57

Tabel 7. Hasil panen padi sawah di Desa Sukarahayu, Kec. Tambelang, Kab. Bekasi yang diberi biokompos jerami, pupuk mikroba pelarut fosfat dan Zn (MT 2002) (Saraswati dkk. 2001, tidak dipublikasi)

Perlakuan	Jumlah malai per rumpun	Bobot jerami	Bobot gabah isi		Bobot beras
			kg ha ⁻¹		
Kontrol	44.50 cd	4686 d	4029 e	3130 d	
Biokompos	44.00 d	5825 bc	4954 cd	3954 bc	
Biokompos + Zn	59.25 a	7064 a	5133 bcd	4262 b	
Pupuk mikroba pelarut fosfat + Zn	56.75 ab	6910 ab	5845 ab	4583 ab	

Keterangan: angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5%. Biokompos (3 t ha⁻¹), Zn 5kg ha⁻¹, Pupuk mikroba pelarut fosfat (200g ha⁻¹).

PENINGKATAN KESEHATAN TANAH SAWAH SECARA HAYATI

Pada pengendalian hama dan penyakit padi, hingga saat ini petani cenderung meningkatkan Takaran pemakaian pestisida sehingga berdampak semakin meningkatnya biaya produksi dan tingkat pencemaran tanah dan lingkungan.

Dalam upaya menuju pertanian berwawasan lingkungan, pengendalian hama dan penyakit dilakukan secara hayati dan terpadu, seperti penggunaan agen predator, antagonis, parasit, patogen, virus, bahan organik, tanaman unggul, tanaman resisten, imunisasi dengan patogen tidak ganas, bahan kimia selektif, bahan alam, pengaturan kondisi fisik seperti cara agronomis dengan pengaturan pH, penanaman bergilir (rotasi) dan pengeringan (Koul *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2000; Raizada *et al.*, 2001).

Banyak keberhasilan yang telah dicapai dalam pengendalian hama dan penyakit secara hayati, baik dalam skala laboratorium, rumah kaca maupun

lapangan. Pengendalian hayati dengan menggunakan mikroba antagonis terutama bakteri, aktinomiset dan jamur telah teruji potensinya. Pengendali penyakit tanaman, seperti jamur: *Trichoderma hamatum*, *T. viride*, *T. koningi*, *Gliocladium virens*, *G. roseum*, *Penicillium janthinellum*, *Epicocum purpureum*, *Pythium nunn*, bakteri: *Bacillus subtilis*, *B. polymixa*, *Pseudomonas fluorescens*, *P. cepacia*, *Agrobacterium radiobacter* dan aktinomiset: *Streptomyces* spp. (virus HearNPV: *Helicoverpa armigera single-nucleocapsid nucleopolyhedrovirus* sudah banyak dibuktikan (Chen *et al.*, 2000). Nematoda patogen serangga (NPS) yang mengandung insektisida sangat toksik terhadap jenis serangga tanah dan berpotensi sebagai biopestisida pada hama penggerek batang (*Spodoptera* sp.) sehingga aplikasi NPS dapat meningkatkan kesehatan tanah. Nematoda patogen serangga ini efektif terhadap hama penggerek batang padi dan lanas (Fallon *et al.*, 1995; Chaerani *et al.*, 1995).

PUSTAKA

- Adiningsih, J.S. dan S. Rochayati. 1988. Peranan bahan organik dalam meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan produktivitas tanah. hlm. 161-182 dalam Prosiding Lokakarya Nasional Efisiensi Pupuk, Cipayung. 16-17 Nopember 1987. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor
- Albrecht, S.L. 1998. Eukaryotic Algae and Cyanobacteria. p. 94-131 in D.M. Sylvia, J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel, D.A. Zuberer (Eds.). Principles and Applications of Soil Microbiology. Prentice-Hall, Inc.
- Alexander, M. 1977. Introduction to soil microbiology. pp. 333-349 in John Wiley and Sons. New York. pp. 333-349.
- Anonymous. 1982. Propagation and agricultural use of Azolla. China: Azolla propagation and small scale biogas technology. FAO Soils Bulletin 41: 1-21.
- Banik, S. and B.K. Dey. 1982. Available phosphate content of an alluvial soil as influenced by inoculation of some isolated phosphate-solubilizing micro-organisms. Plant and Soil 69: 353-364.
- Baldani J.I, L. Caruso Vera, L.D. Baldani, Silvia R. Goi, J. Dobereiner. 1997. Recent advance in BNF with non-legume plants. Soil Biology and Biochemistry 29(5/6): 911-922.

- Bastian F., A. Colum, D. Piccoli, V. Lunas, R. Baraldi, Bottini. 1998. Production of indole-3-acetic acid and gibberellines A₁ dan A₃ by *Acetobacter diazotrophicus* and *Herbaspirillum seropedicae* in chemically-defined culture media. *Plant Growth Regulation* 24: 7-11.
- Basyarudin. 1982. Penelaahan serapan dan pelepasan fosfat dalam hubungannya dengan kebutuhan tanaman jagung (*Zea mays L.*) pada tanah ultisol dan andisol. Tesis. Fakultas pasca Sarjana, IPB, Bogor.
- Boddey, R.M., de O.C. Oliviera, S. Urquiaga, V.M. Reis, F.L. Olivares, V.L.D. Baldani, J. Dobereiner. 1995. Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: contributions and prospects for improvement. *Plant Soil*. 174:195-209.
- Chaerani, M.F. Finnegan, M.J. Downes, and C.T. Griffin. 1995. Pembiakan massal nematoda patogen serangga *Steinernema* dan *Heterorhabditis* isolat Indonesia secara *in vitro* untuk pengendalian hama penggerek batang padi secara hayati. hlm. 133-138 dalam Prosiding Panel Diskusi dan Poster Ilmiah Pekan IPTEK 1995. PUSPIPTEK Serpong. pp. 133-138.
- Chasan R. 1993. Embryogenesis: new molecular insight. *The Plant Cell*. 5:597-599.
- Chen X., Sun X., Hu Z., Li M, O'Reilly D.R., Zuidema D., Vlak J.M., 2000, Genetic engineering of *Helicoverpa armigera* single-nucleocapsid nucleopolyhedrovirus as an improved pesticide, *Journal Invertebr Pathol* 76(2): 140-6
- Dobereiner, J. and F.O. Pedrosa. 1987. Nitrogen-fixing bacteria in non-leguminous crop plants. Springer, Berlin. 168 pp.
- Dobermann A. and P.F. White. 1999. Strategies for nutrient management in irrigated and rainfed lowland rice systems. *Nutr. Cycl. AGroecosyst*. 53:1-18.
- Fallik, E., Y. Okon, Y. Epstein, A. Goldman, and M. Fischer. 1988. Identification and qualification of IAA and IBA *Azospirillum brasilense* inoculated maize roots. *Soil Biology and Biochemistry*. 21:147-153.
- Fallon, D., C. Griffin, Chaerani, and M. Downes. 1995. Field control potential of indigenous entomopathogenic nematodes against rice stem borers on Java. Paper presented to the Irish Society of Zoologist. 15 p.
- Goenadi, D. H., R. Saraswati, dan Y. Lestari. 1993. Kemampuan melarutkan fosfat dari beberapa isolat bakteri asal tanah dan pupuk kandang sapi. *Menara Perkebunan* 61(2): 44-49.
- Goenadi, D. H., dan R. Saraswati. 1993. Kemampuan melarutkan fosfat dari beberapa isolat fungi pelarut fosfat. *Menara Perkebunan* 61(3): 61-66.

- Illmer, P. and F. Schinner. 1992. Solubilization of inorganic phosphorus microorganisms isolated from forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 24 (4):389-395
- Ito, J. 1977. Behaviour and fixation of nitrogen in paddy field. *Niigata Agronomy*. 13: 51-61 (In Japanese).
- James E.K., P. Gyaneshwara, W.L. Barraquio, N. Mathan, J.K. Ladha. 2000. Endophytic diazotroph associated with rice. In J K Ladha, P M Reddy (Eds.). *The Quest for Nitrogen Fixation in Rice*. IRRI.
- James E., F.L. Olivares. 1997. Infection and colonization of sugarcane and other graminaceous plants by endophytic diazotrophicus. *Plant Science* 17: 77-119.
- Kennedy, A.C. and R.I. Papendick. 1995. Microbial characteristics of soil quality. *J. Soil Water Conservation* 50: 243-248.
- Koul O., Jain M.P., Sharma V.K., 2000, Growth inhibitory and antifeedant activity of extracts from *Melia dubia* to *Spodoptera litura* and *Helicoverpa armigera* larvae. *Indian J Exp. Biology* 38(1): 63-8
- Kyuma, Kazutake. 2004. *Paddy Soil Science*. Kyoto Univ. Press and Trans Pacific Press. Kyoto.
- Ladha J.K., F.J. de Bruijn, and K.A. Malik. 1997. Introducing assessing opportunities for nitrogen fixation in rice: a frontier project. *Plant and Soil* 194: 1-10
- Ladha, J.K., S. Milyan, and M. Garcia. 1989. *Sesbania rostrata* as a green manure for lowland rice. Growth, N₂ fixation, *Azorhizobium sp.*, inoculation, and effects on succeeding crop yield and nitrogen balance. *Biology Fertility Soils*, 7:191-197.
- Ladha, J.K., A. Tirol-Padre, C.K. Reddy, and W. Ventura. 1993. Prospects and problems of biological nitrogen fixation in rice production: a critical assessment. In: Palacios R., Mora J., Newton W.E. editors. *New horizons in nitrogen fixation*. Dordrecht (Netherlands): Kluwer Academic Publishers. p.677-682.
- Ladha J.K. and P.M. Reddy. 1995. Extension of nitrogen fixation to rice: necessity and possibilities. *GeoJournal* 35: 363-372.
- Ladha, J.K. and P.M. Reddy. 2000. The quest for N₂-fixation in rice. *Proceedings of the Third working Group Meeting on Assessing Opportunities for N₂-fixation in Rice*, 9-12 Aug.1999. Los Banos, Laguna, Philippines. Makati City (Philippines): IRRI, 351p.

- Matsunaga, T., B. Tangcham, and S. Somchai. 1977. Ecology of non-symbiotic nitrogen fixers and vacetylene reduction in paddy fields of Thailand. Tech. Bull. (Trop. Agric. res. Center, Tokyo). No. 6.
- Matoh, T. R. Saraswati, and J. Sekiya. 1992. Growth characteristics of *sesbania* under adverse condition in relation to use as green manure in Japan. Soil Science and Plant Nutrition 38(4): 741-747. Japan
- Okon, J., Sarig, S., and Blum A. 1989. Promotion of root growth in *Sorghum bicolor* inoculated with *Azospirillum braziliense*. p. 196-200. In T. Hattori, Y. Ishida, Y. Maruyama, R. Y. Morita, and A. Uchida (ed.). Recent advances in microbial ecology. Japan Science Society Press.
- Olivares, F.L., Baldani, V.L.D., Reis, V.M., Baldani, J.I., and Dobereiner, J. 1996. Occurrence of the endophytic diazotrophs *Herbaspirillum* spp. In roots, stems and leaves predominantly of Gramineae. Biology Fertility Soils 21: 197-200.
- Ono, S. and H. Koga. 1984. Natural nitrogen accumulation in paddy soil in relation to nitrogen fixation by blue-green algae. Jpn. Journal Soil Science and Plant Nutrition 55: 465-470 (In Japanese).
- Prihatini T., S. Brotonegoro, S. Abdulkadir, dan Harmastini. 1980. Pengaruh pemberian *Azolla pinnata* terhadap terhadap produksi padi IR-36 pada tanah Latosol Cibinong. hlm. 75-82 dalam Pros. No.1/Pen. Tanah Cipayung 7-10 Oktober, Pusat Penelitian Tanah, Bogor.
- Prihatini, T. dan S. Komariah. 1988. Pemanfaatan *Azolla spp.* dalam budidaya padi sawah. hlm. 217-227 dalam Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Quispel, A. 1974. General Introduction. pp.1-8 In the Biology of Nitrogen Fixation, North-Holland Res. Monographs. Vol. 33. (Cited from Kawaguchi, K. (Ed.) 1978. Paddy Soil Science. Kodansha, Tokyo. In Japanese).
- Raizada, B, M.K. Srivastava, R.A. Kaushal, and R.P. Singh. 2001. Azadirachtin, a neem biopesticide: subchronic toxicity assessment in rats. Food Chem Toxicol 39 (5): 477-83.
- Roger, P.A. and S.A. Kulasooriya. 1980. Blue-green algae and rice. International Rice Research Institute, Los Banos.
- Roger, P.A. and I.Watanabe. 1986. Technologies for utilizing biological nitrogen fixation in wetland rice: potentialitis, current usage, and limiting factors. Fertilizer Research 9: 39-77.
- Roger P.A. and J.K. Ladha. 1992. Biological N₂ fixation in wetland rice fields: estimation and contribution to nitrogen balance. Plant Soil 141: 41-55.

- Saraswati, R., T. Match, and J. Sekiya. 1992. Nitrogen fixation of *sesbania rostrata*: contribution of stem nodules to nitrogen acquisition. *Soil Science and Plant Nutrition* 38(4): 775-780. Japan
- Yoshida, T., R.A Roncal, and E.M. Bautista. 1973. Atmospheric nitrogen fixation by photosynthetic microorganisms in a submerged Philippine soil. *Soil ASci. Plant Nutrition*. 19:117-123.
- Venkataraman, G.S. 1979. Algal inoculation on rice fields. p. 331-321. *in* International Rice Research Institute. Nitrogen and Rice. Los Banos. Philippines.
- Wareing, P.F., and I.D.J Phillips. 1978. The Control of Growth and Differentiation in Plants (2nd). William Clowes & Sons Limited. Great Britain. 347 p.

7. PENGELOLAAN AIR PADA TANAH SAWAH

Kasdi Subagyo, Ai Dariah, Elsa Surmaini, dan Undang Kurnia

Pengelolaan air berperan sangat penting dan merupakan salah satu kunci keberhasilan peningkatan produksi padi di lahan sawah. Produksi padi sawah akan menurun jika tanaman padi menderita cekaman air (*water stress*). Gejala umum akibat kekurangan air antara lain daun padi menggulung, daun terbakar (*leaf scorching*), anakan padi berkurang, tanaman kerdil, pembungaan tertunda, dan biji hampa.

Tanaman padi membutuhkan air yang volumenya berbeda untuk setiap fase pertumbuhannya. Variasi kebutuhan air tergantung juga pada varietas padi dan sistem pengelolaan lahan sawah. Pengaturan air untuk sistem mina-padi berbeda dengan sistem sawah tanpa ikan. Ini berarti bahwa pengelolaan air di lahan sawah tidak hanya menyangkut sistem irigasi, tetapi juga sistem drainase pada saat tertentu dibutuhkan, baik untuk mengurangi kuantitas air maupun untuk mengganti air yang lama dengan air irigasi baru sehingga memberikan peluang terjadinya sirkulasi oksigen dan hara. Dengan demikian teknik pengelolaan air perlu secara spesifik dikembangkan sesuai dengan sistem produksi padi sawah dan pola tanam.

Pengelolaan air untuk sawah lama dengan sawah bukaan baru harus dibedakan. Pada sawah lama umumnya telah terbentuk lapisan kedap air di bawah zona pengolahan tanah yang sering disebut dengan lapisan tapak bajak (*plow pan*), sedangkan pada sawah baru lapisan ini belum terbentuk. Dari segi kebutuhan air untuk irigasi, sawah lama akan lebih efisien dibanding sawah bukaan baru karena sedikit terjadi kehilangan air melalui perkolasi.

Di Indonesia, sawah sering dikategorikan menjadi tiga yaitu (a) sawah beririgasi; (b) sawah tadah hujan; dan (c) sawah rawa (lebak dan pasang surut). Sistem pengelolaan air pada ketiga macam sawah tersebut sangat berbeda, karena perbedaan kondisi hidrologi dan kebutuhan air. Dalam bab ini akan dibahas lahan sawah beririgasi dan sawah tadah hujan. Teknik pengelolaan air lahan sawah yang diuraikan dalam bab ini selain didasarkan pada kebutuhan air untuk tanaman (baik padi maupun palawija) juga didasarkan pada sistem pengelolaan lahan sawah.

Untuk pengembangan tanaman padi dalam kaitannya dengan efisiensi pemanfaatan air, telah ditemukan teknologi irigasi yang dikenal dengan irigasi "macak-macak" (Abas, 1980; Abas dan Abdurachman, 1981; Abas dan Abdurachman, 1985), di mana lahan sawah tidak digenangi tetapi cukup hanya

dijenuhi untuk mendapatkan hasil padi yang tidak berbeda dengan lahan yang digenangi 5 cm. Pengolahan tanah dengan cara dilumpurkan (*puddling*) pada sawah bukaan baru juga telah diteliti meskipun belum dikaitkan dengan produksi tanaman padi. Hasilnya menunjukkan bahwa makin intensif pelumpuran dilakukan, makin kecil kehilangan air melalui perkolasi yang berimplikasi pada peningkatan efisiensi pemanfaatan air (Subagyono *et al.*, 2001).

Pada skala makro, irigasi sering diterapkan secara tidak efisien. Kehilangan air di sepanjang saluran melalui rembesan (*seepage*) masih tergolong tinggi. Sebagian besar petani menerapkan irigasi dengan prinsip mengairi lahannya dengan volume air sebanyak mungkin tanpa menghiraukan kebutuhan optimum air untuk pertanamannya, sementara sebagian lahan petani lainnya tidak mendapatkan air cukup yang berakibat pada rendahnya produktivitas tanaman. Penerapan irigasi yang tidak efisien bisa terjadi melalui cara pemberian air yang tidak tepat baik jumlah dan waktunya ataupun oleh kehilangan air yang berlebihan melalui rembesan (*seepage*).

Isu mengenai pendangkalan lapisan olah di lahan sawah mengemuka namun belum banyak penelitian yang diarahkan ke sana. Demikian juga dalam keterkaitannya dengan program pengelolaan tanaman terpadu (PTT), teknologi irigasi secara berselang (*intermittent*) merupakan strategi pengelolaan air yang perlu dikembangkan. Isu lain yang berkaitan dengan polusi pada lahan sawah akibat intrusi limbah industri juga merupakan topik penelitian yang secara mendalam perlu dilanjutkan.

Mengingat lahan sawah umumnya tidak digunakan untuk padi secara terus-menerus, kecuali di daerah-daerah yang berpola tanam padi-padi-padi, maka strategi pengelolaan air harus spesifik tanaman. Pada saat lahan sawah yang dikelola untuk tanaman palawija irigasi didasarkan pada kebutuhan air untuk tanaman palawija.

Penelitian pengelolaan air ke depan bertujuan untuk mencari solusi tentang pengelolaan air secara terpadu, pendangkalan lapisan olah melalui pengolahan tanah dalam, kuantifikasi irigasi berselang, peningkatan efektivitas penggunaan pupuk, pengendalian gulma dan penelitian lain yang menyangkut pengelolaan air dan hubungannya dengan pencemaran lingkungan lahan sawah.

Hidrologi lahan sawah

Pengetahuan tentang hidrologi lahan sawah sangat diperlukan dalam merancang strategi pengelolaan air. Karakteristik hidrologi lahan sawah sangat ditentukan oleh kondisi biofisik lahan. Hidrologi sawah beririgasi berbeda dengan sawah tadah hujan maupun sawah rawa. Oleh karena itu strategi pengelolaan air pada lahan sawah beririgasi akan berbeda dengan pada lahan sawah tadah hujan maupun sawah rawa.

Karakteristik hidrologi lahan sawah

Dipandang dari segi hidrologi atau rezim air alami, Moormann dan van Breemen (1978) membedakan lahan sawah menjadi tiga yaitu lahan sawah pluvial, phreatik, dan fluxial (Tabel 1).

Modifikasi rezim air alami dari kondisi kering menjadi lebih basah dapat dilakukan dengan dua cara:

1. Perataan (*leveling*) dan pembuatan pematang (pembuatan petak-petak sawah) sehingga terjadi penggenangan air secara merata.
2. Irigasi ke petak-petak sawah, baik dari sumber air di luar daerah persawahan maupun aliran (*overflow*) dari petak yang lebih tinggi ke petak yang lebih rendah.

Moormann dan van Breemen (1978) menyarankan agar dalam penentuan kualitas lahan ketersediaan air dalam tanah sawah pluvial mensyaratkan adanya pengamatan dan pengukuran terhadap hal-hal berikut (a) jumlah dan sebaran curah hujan; (b) kapasitas menahan air tanah pada zona perakaran, terutama ditentukan oleh tekstur dan mineral liat serta batas-batas tertentu oleh kandungan bahan organik; (c) kehilangan yang disebabkan oleh aliran permukaan, perkolasi di bawah zona perakaran yang ditentukan oleh pembentukan (genesis) tanah dan tekstur tanah; dan (d) faktor tanah dan pengelolaan lahan yang penting untuk retensi air.

Untuk lahan sawah phreatik dan fluxial penentuan curah hujan efektif dan sifat menahan air tanah sangat penting, tetapi sebagian atau sepenuhnya dapat dipenuhi oleh ketersediaan langsung dari sumber luar air tanah, air permukaan atau keduanya.

Namun demikian sawah phreatik dan/atau fluxial tidak menjamin tersedianya langsung tanah yang cukup. Jumlah dan keteraturan pasokan aliran bawah permukaan (*sub-surface flow*) dan air permukaan (*surface flow*) pada zona perakaran dan pergerakan air tanah (*groundwater flow*) tergantung sepenuhnya pada iklim. Ketersediaan air interflow mengikuti curah hujan dari daerah tangkapan air tanah.

Ketersediaan air tergantung pada kondisi cuaca setempat (lokal) atau dalam beberapa hal tergantung pada sistem pelembahan sungai besar atau pada cuaca di daerah aliran sungai (DAS) hulu yang seringkali cukup jauh jaraknya. Oleh karena itu pada tahun-tahun dengan curah hujan rendah, luasan yang berhasil ditanami padi lebih sempit dibanding pada tahun-tahun dengan curah hujan tinggi. Pola yang sama juga terlihat pada sawah yang diratakan dan berpematang (*antraquic*) jika air irigasi tidak cukup tersedia.

Tabel 1. Karakteristik hidrologi lahan sawah

Lahan sawah	Karakteristik
<i>Pluvial</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sumber air berasal dari air hujan • Kelebihan air hilang melalui perkolasi dan aliran permukaan • Terdapat di daerah landai sampai lereng curam • Air tanah dalam, drainase baik, tidak ada gejala jenuh air dalam profil tanah • Padi ditanam sebagai padi gogo
<i>Phreatik</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sumber air berasal dari air hujan dan air tanah • Air tanah (<i>phreatic</i>) dangkal, paling tidak pada waktu musim tanam • Kelebihan air hilang melalui aliran permukaan • Tidak pernah tergenang lebih dari beberapa jam • Dalam profil tanah ada gejala jenuh air (<i>gley mottling</i>) • Bila tanpa perataan (<i>levelling</i>) dan pembuatan pematang, akan lebih baik ditanami padi gogo • Bila dengan perataan dan pembuatan pematang dapat dikembangkan untuk padi sawah
<i>fluvial</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sumber air seluruhnya atau sebagian berasal dari aliran permukaan, air sungai dan air hujan langsung • Dalam keadaan alami tergenang air selama beberapa bulan yaitu selama padi ditanam • Terdapat di daerah lembah, dataran aluvial sungai dan sebagainya • Drainase permukaan dan drainase dalam (perkolasi) lambat sehingga genangan air mudah terjadi • Padi ditanam sebagai padi sawah

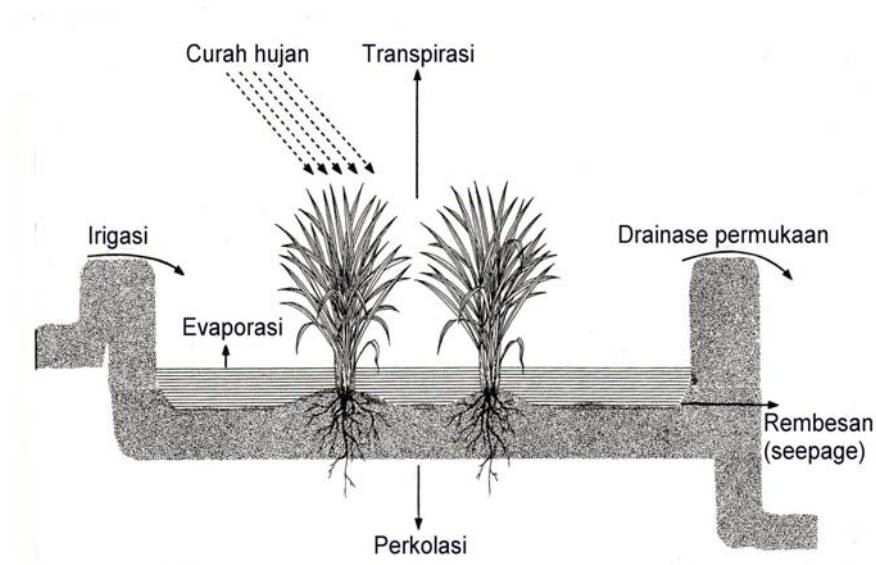
Lengas tanah optimal dijumpai pada sawah irigasi yang berada pada daerah dengan sumber air berlimpah, yaitu pada daerah dengan curah hujan yang cukup untuk irigasi, walaupun dalam sistem irigasi sederhana seperti misalnya pada lahan yang berteras di Jawa dan Bali. Air tidak selalu tersedia cukup pada lahan sawah yang memiliki sistem irigasi, kalau debit air sungai sebagai sumber air irigasi tidak mencukupi akibat kerusakan DAS. Jadi kualitas lahan sawah sangat tergantung pada ketersediaan lengas yang beragam dari satu tempat ke tempat lain dari tahun ke tahun bahkan di daerah beririgasi sekalipun. Oleh karena itu keragaman ini harus dipertimbangkan dalam melakukan evaluasi lahan tidak terkecuali di daerah beririgasi.

Neraca air

Neraca air didefinisikan sebagai perimbangan antara air yang masuk ke suatu batasan hidrologi dengan air yang keluar. Neraca air tersebut dapat dihitung dalam suatu zona perakaran, zona yang telah ditetapkan pada lahan tertentu atau bahkan dapat dihitung pada skala yang lebih luas. Dengan demikian sebelum menghitung neraca air perlu ditetapkan kondisi batasan (*boundary condition*) zona-zona tertentu. Secara umum dengan mengetahui jumlah air yang masuk (W_{in}) dan air yang keluar (W_{out}), dapat dihitung neraca air pada periode waktu tertentu. Pada Gambar 1 disajikan neraca air pada zona perakaran untuk sawah beririgasi. Secara matematis neraca air dapat ditetapkan sebagai berikut:

$$\text{Air masuk} - \text{air keluar} = \Delta \text{ cadangan air}$$

atau $W_{in} - W_{out} = \Delta S$ (6.1)



Gambar 1. Skema neraca air pada lahan sawah beririgasi (Yoshida, 1981 dengan modifikasi)

ΔS merupakan perubahan lengas tanah pada sawah tadah hujan (di lahan kering) atau perubahan tinggi muka air pada sawah beririgasi atau sawah rawa.

Pada umumnya komponen air masuk (W_{in}) ke lahan sawah beririgasi meliputi air hujan dan air irigasi seperti diformulasikan sebagai berikut:

$$W_{in} = P + I \quad (6.2),$$

dimana P adalah curah hujan dan I adalah irigasi. Di daerah yang berlereng komponen air masuk dapat berupa aliran permukaan dari lahan kering berlereng di atasnya. Namun di dalam perhitungan neraca air tidak disertakan karena air aliran permukaan tersebut umumnya masuk saluran pembatas antara lahan sawah dengan lahan kering di atasnya yang sering disebut sebagai saluran intersepsi.

Komponen air keluar (W_{out}) meliputi air yang hilang melalui proses evapotranspirasi (ET), air yang hilang melalui perkolasi (Pk) dan rembesan/*seepage* (Sp), dan melalui aliran permukaan (R). Dalam hukum konservasi masa (*law of mass conservation*) neraca air secara matematis dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\Delta S = P + I - ET - Pk - Sp - R \quad (6.3)$$

dimana P: curah hujan; I: irigasi; ET: evapotranspirasi; Pk: perkolasi; Sp: seepage; dan R: aliran permukaan. Karena lahan sawah beririgasi terletak pada posisi yang datar dan dilengkapi dengan pematang-pematang pada setiap petakan sawah, maka aliran permukaan dapat diabaikan, sehingga rumus (6.3) berubah menjadi:

$$\Delta S = P + I - ET - Pk - Sp \quad (6.4)$$

Untuk menghitung perubahan cadangan air di dalam tanah diperlukan data kedalaman akar tanaman dan karakteristik kelengasan tanah di lapangan. Menurut Yoshida (1981), untuk mengetahui kedalaman akar padi di lapangan sangat sulit. Selain itu untuk mengetahui kebutuhan air irigasi di lahan sawah, parameter kapasitas cadangan air tidak digunakan. Jika kondisi kelengasan mula-mula (*initial moisture*) diketahui, kebutuhan air irigasi dapat dihitung sebagai berikut:

$$\Delta S = 0$$

$$\text{atau} \quad P + I = ET + Pk + Sp \quad (6.5)$$

$$\text{atau} \quad I = ET + Pk + Sp - P \quad (6.6)$$

ET atau kebutuhan air dapat dihitung dengan beberapa cara yaitu dengan persamaan Penman dan Thornwaite dan akan dibahas dalam subbab berikut.

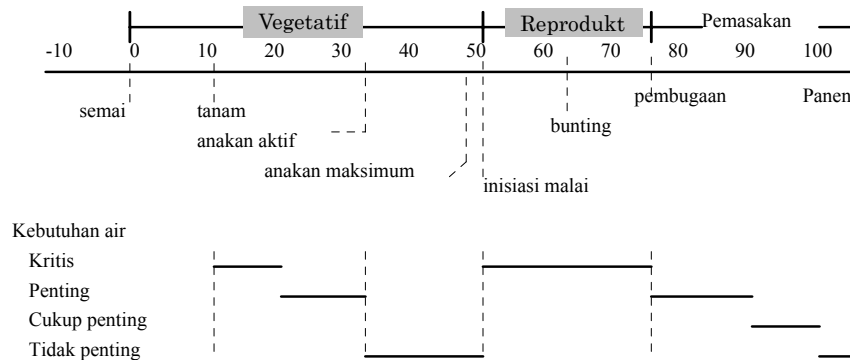
Kebutuhan air

Sekitar 83% wilayah Indonesia mempunyai curah hujan tahunan >2.000 mm, namun sebagian besar terdistribusi selama musim hujan. Dengan hanya menerapkan sistem pengelolaan air konvensional yang sangat tergantung pada curah hujan, daerah kekeringan terutama pada musim kemarau tidak dapat

dihindari. Akibatnya tanaman dapat mengalami cekaman air sehingga produksinya dapat menurun drastis. Ada kalanya petani tidak mau mengambil risiko produksi tanamannya rendah, maka membiarkan lahannya tidak ditanami pada musim kemarau. Dengan penggunaan teknologi irigasi suplemen, musim tanam tanaman pangan tidak terbatas hanya pada musim hujan, tetapi bisa diperpanjang sampai pertengahan musim kemarau.

Tanaman pangan utama yang dibudidayakan di lahan sawah selain padi, antara lain adalah jagung, kedelai, kacang hijau, dan kacang tanah. Tanaman tersebut umumnya ditanam pada musim tanam ketiga (MK-2) pada lahan sawah beririgasi atau masa tanam kedua dan ketiga (MK-1 dan MK-2) pada lahan sawah tadah hujan. Secara umum, tanaman palawija memerlukan air sekitar 100-200 mm bulan⁻¹. Namun jumlah ini bervariasi menurut jenis dan fase tanaman, distribusi ukuran pori tanah, kesuburan tanah, dan pengolahan tanah. Vergara (1976) menyatakan bahwa peranan air sangat penting pada saat pembentukan anakan dan awal fase pemasakan, sebaliknya bila terjadi pada akhir fase vegetatif dan akhir fase pemasakan (Gambar 2).

Tahap pertumbuhan

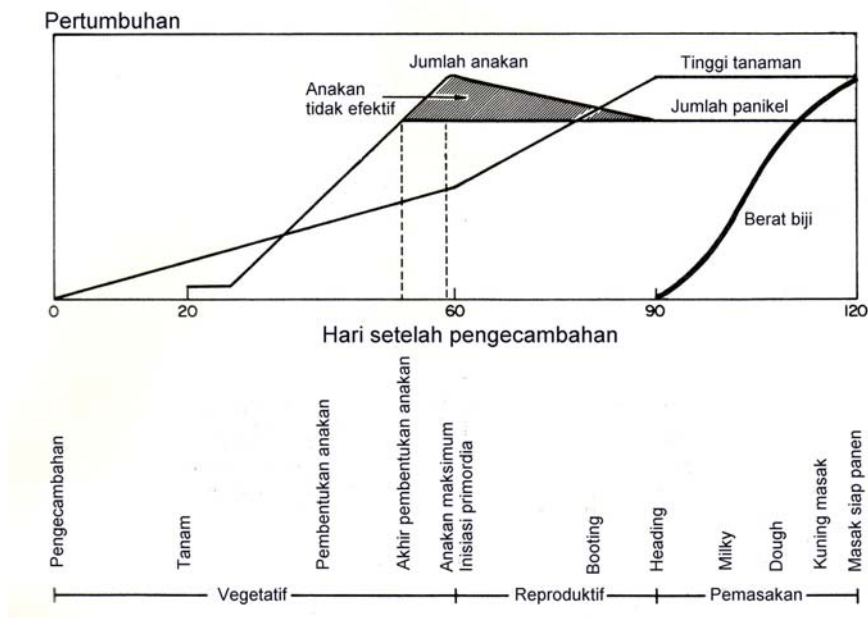


Gambar 2. Kebutuhan air pada setiap fase tumbuh tanaman pangan (Vergara, 1976)

Pada pertanaman padi terdapat tiga fase pertumbuhan yaitu fase vegetatif (0-60 hari), fase generatif (60-90 hari) dan fase pemasakan (90-120 hari) sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.

Untuk mengetahui jumlah air yang harus disediakan untuk irigasi lahan pertanian, informasi atau data kebutuhan air tanaman sangat diperlukan. Kebutuhan air tanaman tergantung jenis dan umur tanaman, waktu atau periode

pertanaman, sifat fisik tanah, teknik pemberian air, jarak dari sumber air sampai lahan pertanian, luas areal pertanian yang akan diirigasi. Oleh sebab itu, agar penggunaan air irigasi lebih efisien dan efektif, maka sangat penting mengetahui pemakaian air konsumtif tanaman (evapotranspirasi).



Gambar 3. Fase pertumbuhan padi (Yoshida, 1981 dengan modifikasi)

Pada lahan sawah, kehilangan air dapat melalui evaporasi, transpirasi, dan perkolasi. Kehilangan air melalui perkolasi sangat bervariasi. Pada Tabel 2 disajikan data kebutuhan air untuk sawah irigasi di 43 lokasi di China, Jepang, Korea, Philipina, Vietnam, Thailand, dan Bangladesh. Pada lahan sawah beririgasi, kehilangan air bervariasi antara 5,6–20,4 mm hari⁻¹. Yoshida (1981) melaporkan variasi kehilangan air yang paling sering diamati berkisar antara 6–10 mm hari⁻¹. Dengan demikian rata-rata jumlah air yang dibutuhkan untuk memproduksi padi yang optimal adalah 180–300 mm bulan⁻¹. Dalam satu periode tanam juga dilaporkan bahwa kebutuhan air untuk seluruh operasional pengelolaan sawah beririgasi (pembibitan, persiapan lahan, dan irigasi) adalah 1.240 mm.

Untuk persiapan lahan terutama kebutuhan air untuk pelumpuran (*puddling*) bervariasi tergantung pada kadar air tanah awal dan intensitas pelumpurannya (Tabel 3).

Pemakaian air konsumtif dapat diketahui dengan cara perimbangan berat atau penetapan volume air menggunakan lisimeter, tensiometer, dan *neutron*

probe, atau ditetapkan berdasarkan pendugaan, seperti metode pendugaan dari Penman (1956), Thornthwaite (1948), dan Blaney-Criddle (1962). Setiap metode pendugaan evapotranspirasi tersebut menggunakan parameter-parameter penduga yang berbeda, diantaranya iklim, tanah dan faktor tanaman. Konsep evapotranspirasi potensial (PE) juga pernah diusulkan oleh Thornthwaite (1948) untuk menghitung kebutuhan air, yaitu kehilangan air oleh tanaman jika tanah dalam kondisi tidak pernah kekurangan air.

Tabel 2. Kebutuhan air pada lahan sawah beririgasi

Kebutuhan air	Jumlah air
Kehilangan air (mm hari⁻¹)	
◆ Evaporasi	1,0-6,2
◆ Transpirasi	1,5-9,8
◆ Perkolasi	<u>0,2-15,6</u>
Total kehilangan	5,6-20,4
Operasional pengelolaan (mm tanaman⁻¹)	
◆ Pembibitan	40
◆ Persiapan lahan	200
◆ Irigasi	<u>1.000</u>
Total	1.240

Sumber: Kung (1971) dalam Yoshida (1981)

Tabel 3. Kebutuhan air untuk pelumpuran (*puddling*) pada berbagai jenis tanah (Subagyono, 2001)

Jenis tanah	Kadar air awal	Kebutuhan air	
		P1	P2
	% vol	m ³ .ha ⁻¹	
Liat	51.00	1914	2269
Liat berpasir	49.20	td	1770
Lempung liat berpasir	37.70	td	1659
Lempung berdebu	32.40	1521	1670

P1: sekali dicangkul dan sekali dilumpurkan; P2: sekali dicangkul dan dua kali dilumpurkan; td = tidak diamati

Kemudian oleh Penman terminologi ini lebih disebut sebagai transpirasi potensial yang didefinisikan sebagai kehilangan air maksimum dari suatu tanaman berikut adalah beberapa metode untuk menghitung evapotranspirasi potensial.

Metode Penman

Untuk mengestimasi evapotranspirasi potensial dengan metode ini membutuhkan data pengamatan lapang yang mencakup radiasi neto, suhu, kelembapan, dan kecepatan angin. Pada dasarnya ada tiga persamaan yang merupakan tahap di dalam estimasi evapotranspirasi potensial dengan metode ini. Persamaan yang pertama tergantung pada kekuatan pengeringan udara sebagai berikut:

$$E_a = 0,35 (e_s - e_d)(0,5 + u_d/100) \quad (6.7),$$

dimana,

E_a = aerodinamik evaporasi (mm hari⁻¹)

e_s = tekanan uap jenuh pada rata-rata suhu udara (mm Hg)

e_d = tekanan uap aktual di udara (mm Hg)

u_d = kecepatan angin pada ketinggian 2 m di atas permukaan tanah (mil/hari)

Persamaan kedua adalah estimasi radiasi neto untuk evaporasi dan pemanasan permukaan tanah:

$$Rn = A - B \quad (\text{mm hari}^{-1}) \quad (6.8)$$

Secara matematis masing-masing diformulasikan sebagai berikut:

$$A = (1-r)Ra(0,18 + 0,55 n/N) \quad (6.9)$$

dimana,

A = radiasi gelombang pendek (*incoming*) (mm hari⁻¹)

r = koefisien pantulan permukaan

Ra = intensitas radiasi di permukaan tanah

n/N = rasio aktual/kemungkinan jam penyinaran penuh

$$B = \sigma T_a^4(0,56 - 0,09 \sqrt{e_d})(0,10 + 0,90 n/N) \quad (6.10)$$

dimana,

B = radiasi gelombang panjang (*outgoing*) (mm hari⁻¹)

σ = konstanta Stefan-Boltzman

T_a = suhu udara rata-rata (°K)

e_d :tekanan uap aktual di udara (mm Hg)

Persamaan Penman merupakan gabungan dari dua persamaan di atas, yaitu:

$$E = (\Delta/\gamma.Rn + E_a)/(\Delta/\gamma + 1) \quad (6.11)$$

dimana

Δ = slop kurva tekanan uap jenuh pada rata-rata suhu udara (mm Hg °C⁻¹)

γ = konstanta persamaan psychrometer bola basah dan bola kering (0,49 mm Hg °C⁻¹)

Metode Thornthwaite

Metode Thornthwaite menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E = 1,6b (10 t I^{-1})^a \quad (6.12)$$

dimana,

E = evapotranspirasi potensial bulanan (cm)

t = suhu rata-rata bulanan (°C)

a = fungsi kibik dari I

b = faktor koreksi untuk panjang hari (jam dan hari) dalam bulan tertentu

I = indeks panas, diperoleh dengan cara menjumlahkan nilai indeks I bulanan selama 12 bulan, yang diperoleh dari:

$$I = (t/5)^{1,514} \quad (6.13)$$

Sedangkan nilai a diperoleh dari:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0,01792 I + 0,49239 \quad (6.14)$$

Metode Blaney-Criddle

Evapotranspirasi dihitung menggunakan rumus:

$$U = k.p (45,7 t + 813).10^{-2} \quad (6.15)$$

dimana:

U = pemakaian air konsumtif (evapotranspirasi) bulanan (mm)

t = suhu (°C)

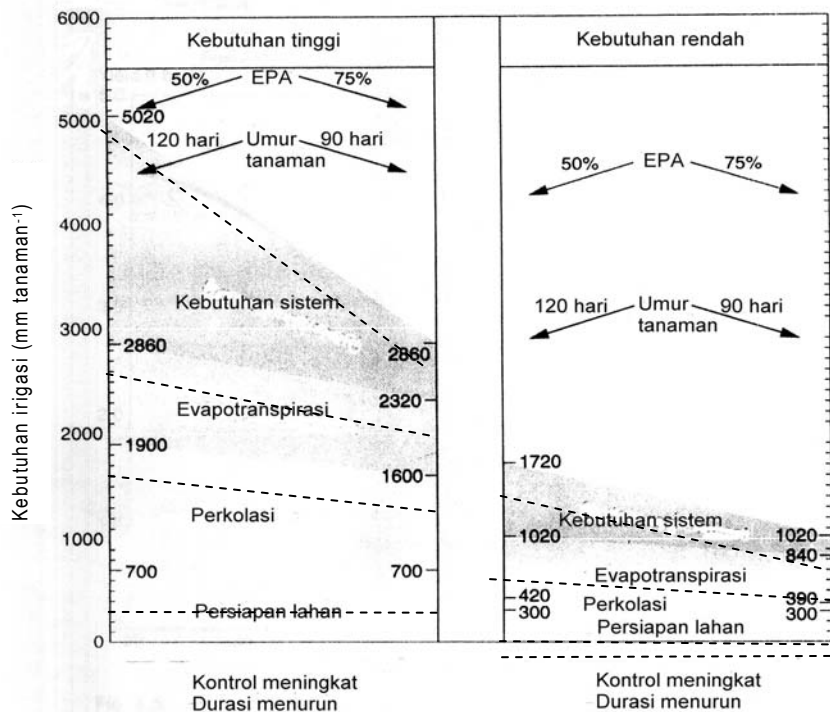
k = koefisien tanaman, diperoleh dari pengukuran di lapangan, dan berbeda untuk setiap varietas/jenis tanaman

p = persentase jam siang hari bulanan, dihitung dari catatan suhu setempat.

Hampir selama periode pertumbuhannya padi memerlukan kondisi lahan yang jenuh air. Kebutuhan air tanaman berkisar antara 350-700 mm masa tanam⁻¹ dan sangat sensitif terhadap cekaman air. Evapotranspirasi mulai meningkat pada fase vegetatif dan mencapai maksimum beberapa saat sebelum pembungaan sampai awal pengisian polong. Jika kadar air tanah turun 70-80% dari kondisi jenuh produksi tanaman mulai turun, jika kadar air tanah mencapai 50% produksi turun sampai 50-70% (Dorenboos and Kassam, 1979). Efisiensi penggunaan air tanaman padi ditingkatkan dengan sistem Tabela yang hanya memerlukan penggenangan air 2-3 cm sejak umur 15-50 hari, dan selanjutnya cukup dengan macak-macak. Teknik tanpa olah tanah yang dikombinasikan dengan selang irigasi 3 hari sekali atau intermitten selama fase vegetatif dapat menghemat irigasi sampai 50%. Batas kritis pemberian air irigasi sebesar 7 mm hari⁻¹ untuk kultivar IR-64 dan Cliwung (Budi, 2000).

Kebutuhan air tanaman jagung dan kacang tanah diperkirakan 500-700 mm musim⁻¹ dan kehilangan hasil terbesar karena cekaman air terjadi pada fase pembungaan dan pembentukan biji. Sedangkan kebutuhan air tanaman kedelai sebesar 450-700 mm dan periode yang sensitif terhadap cekaman air adalah pada fase pembentukan buah dan pembungaan. Penurunan hasil tanaman jagung karena kekurangan air pada fase pembungaan diperkirakan dapat mencapai 15% (Gardner *et al.*, 1981).

Jumlah air yang diperlukan di dalam proses produksi padi tergantung pada iklim, posisi lanscape, periode pertanaman, karakteristik drainase tanah, dan pengelolaan irigasi. Transpirasi tanaman umumnya terjadi sebesar 5-8 mm hari⁻¹ dan perkolasi pada selang 1-10 mm hari⁻¹. Tergantung posisi lanscape, sifat-sifat tanah, dan efektivitas pelumpuran tanah. Untuk memenuhi irigasi pada periode tanam sampai panen dengan umur tanaman 100 hari akan memerlukan air 520-1.620 mm. Untuk padi dengan umur 130 hari membutuhkan air sebanyak 720-2.160 mm. Penggunaan air irigasi tersebut sangat bervariasi antara musim hujan dan musim kemarau dan sangat tergantung pada tingkat pengelolaan tanaman dan sistem pengelolaannya. Untuk musim kemarau, penggunaan air irigasi dapat mencapai hingga 5.000 mm tetapi juga hanya sebanyak 1.000 mm (Gambar 4) (Greenland, 1997).



Gambar 4. Penggunaan air irigasi pada lahan sawah
 Sumber: Greenland (1997) dengan modifikasi

Pengaruh kekeringan terhadap tanaman kedelai terbesar terjadi pada fase pengisian polong (Allen *et al.*, 1998). Kekurangan air yang terjadi pada fase pembungaan menyebabkan gugurnya bunga, sedangkan pada fase pengisian polong mengakibatkan biji yang dihasilkan menjadi kecil. Sebaliknya penanaman kedelai pada tanah yang basah akan menghambat perkecambahan dan pertumbuhan vegetatif karena kekurangan oksigen. Pengembangan kedelai di lahan kering seyogianya diarahkan pada lahan dengan faktor pembatas minimum, misalnya tidak melakukan penanaman pada lahan dengan ketinggian >1.500 m, lahan dengan kemiringan >25% kecuali dilengkapi dengan teras dan pada lahan yang memiliki curah hujan <250 mm bulan⁻¹ (Ismail dan Effendi, 1985). Kebutuhan air pada setiap fase fenologi beberapa tanaman pangan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kebutuhan air beberapa jenis tanaman pangan menurut fase fenologinya

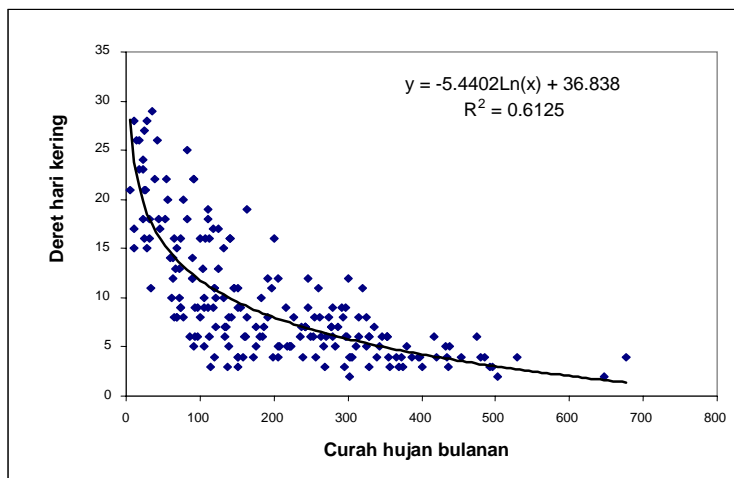
Jenis tanaman	Kebutuhan air tanaman (lama fase fenologi)				
	Pembentukan tunas	vegetatif	Pembungaan	Pengisian polong	Pematangan
Padi	50 mm (10 hari)	320 mm (60 hari)	80 mm (15 hari)	85 mm (20 hari)	65 mm (15hari)
Jagung	56 mm (20 hari)	167 mm (30 hari)	115 mm (15 hari)	250 mm (40 hari)	62 mm (15 hari)
Kacang tanah	51 mm (15 hari)	162 mm (30 hari)	235 mm (35 hari)	162 mm (30 hari)	40 mm (10 hari)
Kedelai	30 mm (20 hari)	165 mm (35 hari)	292 mm (45 hari)	47 mm (10 hari)	41 mm (10 hari)

Sumber: Doorenbos dan Kassam (1979) data diolah

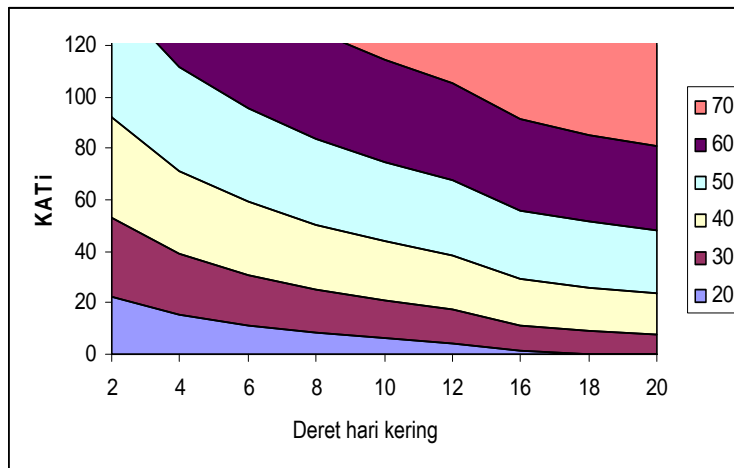
Faktor lain yang perlu diperhatikan dalam memenuhi kebutuhan air adalah deret hari kering, yaitu jumlah hari berturut-turut tanpa kejadian hujan. Kejadian hari kering merupakan indikator yang dapat diandalkan untuk mengukur tingkat kerawanan wilayah terhadap kekeringan. Dikatakan bahwa di daerah tropis terjadinya deret hari kering selama 7 hari atau lebih mempunyai dampak yang serius terhadap hasil tanaman (McCaskill and Kariada, 1992). Castillo *et al.* (1992) menemukan bahwa tidak terjadinya hujan selama lebih dari 15 hari berturut-turut pada fase tepat sebelum atau segera setelah pembentukan malai

dapat menurunkan hasil antara 18-38%. Dikshit *et al.* (1987) menyatakan bahwa cekaman kekeringan akibat terjadinya 16 deret hari kering selama pertumbuhan 20 varietas padi berumur genjah menyebabkan mundurnya umur panen antara 2-27 hari dan menurunnya hasil tanaman antara 10-91%.

Informasi kejadian deret hari kering memerlukan data curah hujan harian dalam periode yang panjang, yang tentu saja tidak mudah didapatkan. Untuk itu hubungan antara curah hujan bulanan dengan deret hari kering akan sangat berguna dalam melihat peluang kejadian hari kering (Gambar 5). Informasi tersebut akan lebih aplikatif di lapangan apabila kejadian deret hari kering dihubungkan dengan fluktuasi ketersediaan air tanah. Fluktuasi kadar air tanah setelah terekspos hari kering sebanyak n hari disajikan pada Gambar 6. Legenda menunjukkan kadar air tanah awal (sumbu Y1) dan setelah terekspos sebanyak n hari akan menurun menjadi kation yang ditunjukkan pada sumbu Y2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa setelah terekspos selama 15 hari kering, air tanah akan turun sampai 50% dari kadar air tanah awal. Grafik ini akan sangat membantu petani untuk menentukan kapan harus memberikan air irigasi dan mencari alternatif sumber air irigasi terutama pada kondisi iklim yang kering.



Gambar 5. Hubungan curah hujan bulanan dan deret hari kering



Gambar 6. Kadar air tanah setelah terekspos deret hari kering

Sumber daya air irigasi

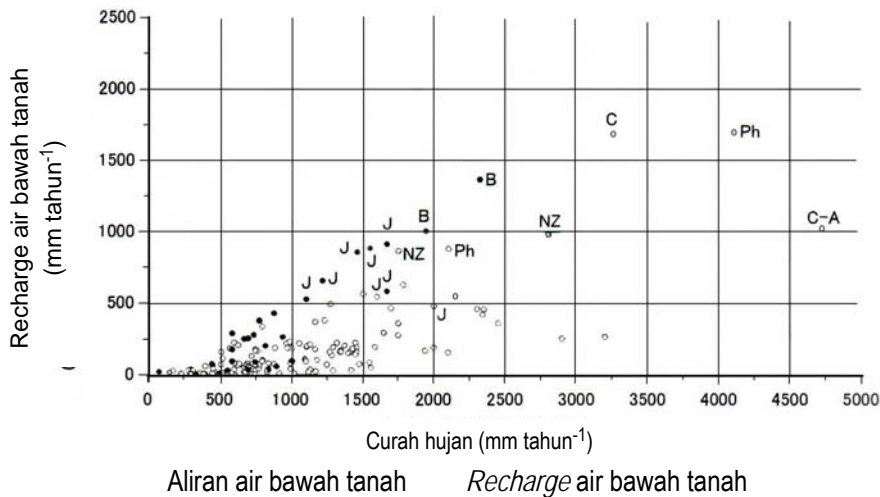
Schwab dan Flevert (1981) membagi sumber air irigasi ke dalam air permukaan (*surface water*), dan air bawah tanah (*groundwater*). Air permukaan meliputi air danau alami, air sungai atau sungai yang dibendung dan dijadikan waduk sekaligus berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik, pencegah banjir, dan lain-lain. Air permukaan dapat ditingkatkan ketersediaannya dengan memanen air hujan/aliran permukaan, sedangkan sumber air bawah tanah biasanya dimanfaatkan melalui pembuatan sumur-sumur dalam atau artesis (*deep wells*), mata air (*springs*) atau menggali/membuat kolam.

Ketersediaan air bawah tanah (*groundwater*) sangat ditentukan oleh berapa besar pengisian (*recharge*) dari curah hujan. Pada umumnya semakin tinggi curah hujan makin besar kemungkinan pengisian air bawah tanah, meskipun hubungan tersebut tidak linear (Gambar 7) karena faktor geologi dan karakteristik tanah sangat menentukan. Hubungan antara curah hujan dan pengisian air bawah tanah (*groundwater recharge*) di daerah humid dan arid telah dilaporkan oleh Tase *et al.* (2003). Sistem pengisian air bawah tanah di daerah arid sangat terbatas yang berimplikasi sulitnya penggunaan air di daerah tersebut. Indonesia yang sebagian besar wilayahnya termasuk pada kawasan humid tropik, sistem pengisian air bawah tanah relatif lebih besar dan sangat menunjang keberlanjutan pengelolaannya untuk pengembangan pertanian.

Sumber air irigasi harus memenuhi syarat kualitas agar tidak berbahaya bagi tanaman yang akan diiri, karena dalam jangka panjang dapat berpengaruh terhadap kualitas hasil atau produk pertanian. Schwab dan Flevert, 1981

mensyaratkan kualitas air irigasi sangat tergantung dari kandungan sedimen atau lumpur dan kandungan unsur-unsur kimia dalam air tersebut. Sedimen atau lumpur dalam air pengairan berpengaruh terhadap tekstur tanah, terutama pada tanah bertekstur sedang sampai kasar akan memperlambat permeabilitas penampang tanah akibat pori-pori tanah terisi atau tersumbat sedimen tersebut, dan menurunkan kesuburan tanah. Sedimen atau lumpur yang mengendap di dalam saluran irigasi akan mengurangi kapasitas pengaliran air dan memerlukan biaya tinggi untuk membersihkannya.

Sifat-sifat kimia air pengairan berpengaruh terhadap kesesuaian air untuk berbagai penggunaan, sehingga aman untuk setiap pemakaian. Sifat-sifat kimia air pengairan yang sangat penting diketahui dalam kaitannya dengan kegiatan pertanian, diantaranya adalah (a) konsentrasi garam total yang terlarut; (b) proporsi garam (Na) terhadap kation lainnya (*sodium adsorption ratio = SAR*); (c) konsentrasi unsur-unsur racun potensial yang dapat mencemari atau merusak tanah; dan (d) konsentrasi bikarbonat, yang berkaiatan erat dengan Ca dan Mg. Bila sifat-sifat kimia air tersebut melebihi konsentrasi yang diizinkan, pertumbuhan tanaman akan terhambat dan mengalami penurunan hasil. Penelitian Ramadhi (2002) memperlihatkan hasil gabah di persawahan Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung berkurang sekitar 60-70% dari produksi normal akibat kualitas air mengandung Na dengan konsentrasi tinggi yang berkisar antara 560-1.680 ppm Na. Dengan pemberian air bersih dan berkualitas, hasil gabah pada lahan persawahan tersebut mencapai 8-10 t ha⁻¹ (Kurnia *et al.*, 2003).



Gambar 7. Hubungan curah hujan dengan pengisian air bawah tanah (*groundwater recharge*) di daerah humid dan arid (Tase *et al.*, 2003). Kondisi sistem air bawah tanah melalui pengisian dari curah hujan diperkirakan mirip dengan kondisi Phillipina

Pada umumnya, aspek kualitas air irigasi sering diabaikan karena perhatian selalu tertumpu pada kuantitas. Salinitas dan salinisasi merupakan masalah yang dapat terjadi di lahan beririgasi, termasuk di lahan sawah beririgasi. Meskipun di Indonesia jarang terjadi, namun hal ini harus tetap diwaspadai. Dari hasil penelitiannya di Kazakhstan Kitamura *et al.* (2003) melaporkan bahwa sumber salinitas ini dapat berasal dari sumber air irigasi yang berkadar garam relatif tinggi atau dapat juga dari air bawah tanah yang melalui proses aliran air ke atas (*upward movement*).

Konsep dasar pengelolaan air

Pengelolaan air yang utama pada lahan sawah adalah irigasi. Secara umum irigasi didefinisikan sebagai pemberian air untuk memenuhi kebutuhan air bagi tanaman. Pekerjaan irigasi meliputi menampung dan mengambil air dari sumbernya, mengalirkannya melalui saluran-saluran ke lahan pertanian dan membuang kelebihan air ke saluran pembuangan. Tujuan irigasi adalah memberikan tambahan (*supplement*) air terhadap air hujan dan memberikan air untuk tanaman dalam jumlah yang cukup dan pada saat dibutuhkan. Irigasi pada lahan sawah dimaksudkan untuk menjenuhkan tanah agar diperoleh struktur lumpur (*puddling*) yang baik bagi pertumbuhan tanaman padi, memenuhi kebutuhan air tanaman, kebutuhan penggenangan, dan mengganti kehilangan air di saluran.

Secara umum, irigasi juga berguna untuk (a) mempermudah pengolahan tanah ; (b) mengatur suhu tanah dan iklim mikro ; (c) membersihkan atau mencuci tanah dari garam-garam yang larut atau asam-asam yang tinggi ; (d) membersihkan kotoran atau sampah yang ada dalam saluran-saluran air ; dan (e) menggenangi tanah untuk memberantas tanaman pengganggu (*gulma*) dan hama penyakit.

Pembangunan sistem irigasi yang meliputi pembangunan bendung dan waduk serta jaringannya memerlukan investasi yang sangat mahal. Oleh sebab itu, air harus digunakan secara efektif dan efisien. Dalam hal itu, penentuan jumlah air yang dibutuhkan untuk mencapai produksi tanaman yang optimal sangat penting dilakukan.

Teknik pengelolaan air

Pengelolaan air di lahan sawah sangat ditentukan oleh kondisi topografi dan pola curah hujan. Lahan sawah yang berasal dari lahan kering yang diairi umumnya berupa lahan irigasi, baik yang berupa irigasi teknis (dengan bangunan irigasi permanen), setengah teknis (dengan bangunan irigasi semi permanen), maupun irigasi sederhana (tanpa bangunan irigasi). Apabila sumber air berasal langsung dari air hujan maka disebut sawah tadah hujan. Sawah yang

dikembangkan di rawa-rawa lebak disebut sawah lebak. Tanah sawah juga dapat berasal dari lahan rawa pasang surut.

Sawah irigasi

Di Indonesia terdapat kurang lebih 5 juta ha sawah beririgasi. Sebagai pengguna air terbesar (85%) sawah beririgasi masih dihadapkan kepada masalah efisiensi, yang disebabkan oleh kehilangan air selama proses penyaluran air irigasi (*distribution losses*) dan selama proses pemakaian (*field application losses*). Tingkat efisiensi di saluran primer dan sekunder diperkirakan sebesar 70-87%, saluran tersier antara 77-81% dan jika digabungkan dengan kehilangan di tingkat petakan, maka efisiensi penggunaan air secara keseluruhan baru berkisar antara 40-60% (Kurnia, 1977 *dalam* Kurnia, 2001). Angka-angka tersebut, dewasa ini diperkirakan akan lebih rendah lagi. Hal ini disebabkan biaya operasi dan pemeliharaan (OP) dari pemerintah dikurangi, belum stabilnya penyerahan wewenang dari pemerintah pusat ke kabupaten/kota dan karena belum siapnya petani di dalam menerima program penyerahan irigasi (Kurnia, 2001).

Penggenangan (standing water)

Rendahnya tingkat efisiensi penggunaan air selama proses pemakaian diantaranya disebabkan oleh kebiasaan petani yang masih senang menggunakan genangan yang tinggi sampai 15 cm secara terus-menerus (*continuous flow*); beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian air (irigasi) macak-macak dan tidak secara terus-menerus (rotasi) hasilnya tidak berbeda nyata dengan genangan tinggi secara terus-menerus (Tabel 5).

Tabel 5. Pengaruh pengelolaan air terhadap hasil padi (Abas dan Abdurachman, 1985)

Perlakuan	Hasil gabah (ton/ha) ^a	
	MH 1980/81	MK 1980 dan 1981
Penggenangan ^b	4,09	5,42
Macak-macak	4,08	5,61

^a Gabah kering giling

^b Penggenangan terus-menerus setinggi 5 cm

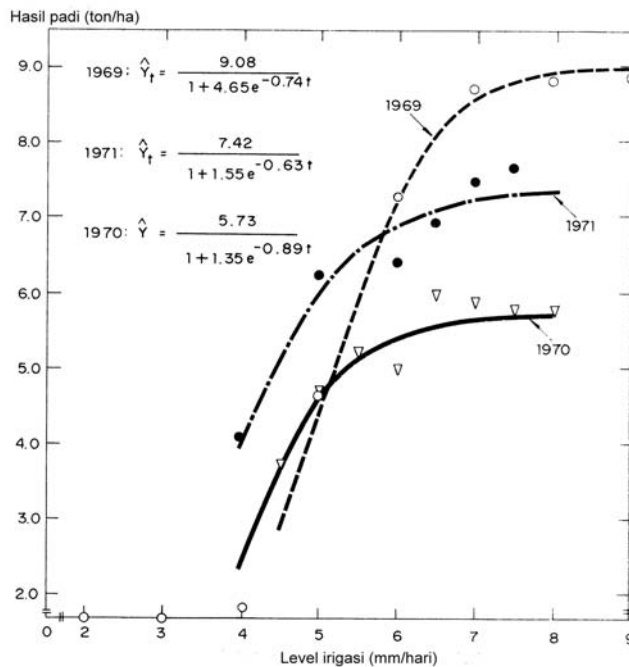
Sistem penggenangan juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi penggunaan air. Genangan dalam (10-15 cm) seperti yang dilakukan petani pada umumnya dapat menyebabkan tingginya kehilangan air lewat perkolasi yang didalamnya juga terlarut unsur hara yang bersifat mobil, sehingga tingkat kehilangan hara juga menjadi tinggi. Penurunan tingkat genangan menjadi 5-7 cm selain dapat menurunkan tingkat kebutuhan air irigasi dan juga dapat meningkatkan hasil tanaman (Tabel 6).

Penelitian yang dilakukan IRRI dengan menggunakan padi varietas IR-8 menunjukkan tidak adanya pengaruh nyata terhadap hasil tanaman untuk tingkat penggenangan antara 1 dan 15 cm. Sistem genangan dangkal (*shallow flooding*), bagaimanapun memberikan hasil per unit penggunaan air yang lebih rendah, salah satunya disebabkan oleh relatif lebih rendahnya kehilangan air lewat perkolasi. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa meskipun pada dasarnya penggenangan secara terus-menerus tidak menyebabkan peningkatan hasil, penggenangan sedalam 5-7 cm secara terus-menerus kemungkinan merupakan praktek terbaik, khususnya dalam hubungannya pengendalian gulma dan efisiensi pemupukan (De Datta *et al. dalam* Bhuiyan, 1980).

Jumlah pemberian air irigasi per periode tertentu berpengaruh pada produktivitas padi. Hasil penelitian IRRI untuk padi varietas IR-8 dengan aplikasi pupuk nitrogen 100 kg ha⁻¹, pemberian air maksimum tercapai pada level 6,5 mm hari⁻¹ pada musim kering 1969, dan 5,5 mm hari⁻¹ pada musim kering 1970 dan 1971 (Gambar 8). Perbedaan nilai maksimum level irigasi antara musim kering tahun 1969 dengan 1970 dan 1971 disebabkan oleh perbedaan evaporasi yang diakibatkan oleh perbedaan radiasi matahari. Penambahan air melebihi nilai maksimum tersebut tidak akan meningkatkan hasil padi secara proposional hingga level 7 mm hari⁻¹ untuk tahun 1970 dan 1971, sehingga tidak dapat lagi menambah keuntungan dari penambahan air irigasi. Nilai maksimum level irigasi pada musim kering 1969 mencapai 9 mm hari⁻¹ (Bhuiyan, 1980).

Tabel 6. Pengaruh sistem irigasi terhadap kebutuhan air irigasi dan hasil padi (Ghosh, 2003)

Metode irigasi	Kebutuhan air irigasi	Hasil padi
	cu.m ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
<i>Water saving method</i> (penggenangan 5-7 cm)	8.918,4	10.560
Penggenangan dalam (penggenagan 10-15 cm)	12.612,8	7.816



Gambar 8. Hubungan antara level irigasi (mm/hari) padi varietas IR-8 dengan penambahan pupuk N 100 kg na^{-1}

Sumber: Bhuiyan (1980) dengan modifikasi

Efisiensi penggunaan air merupakan aspek penting berkenaan dengan upaya peningkatan nilai ekonomi produksi pertanian pada lahan beririgasi. Berkenaan dengan sawah beririgasi, Abas *et al.* (1985) melaporkan bahwa efisiensi penggunaan air pada lahan yang diirigasi secara macak-macak hampir 2 – 3 kali lebih tinggi dibanding dengan lahan yang digenangi terus-menerus (Tabel 7). Hasil yang serupa dilaporkan juga oleh Budi (2001), bahwa dengan irigasi macak-macak dari sejak tanam sampai 7 hari menjelang panen pada musim kemarau maupun musim hujan dapat menghemat penggunaan air 40% dibanding dengan penggenangan secara kontinu.

b. Irigasi bergilir (rotational irrigation)

Sistem irigasi bergilir merupakan teknik irigasi dimana pemberian air dilakukan pada suatu luasan tertentu dan untuk periode tertentu, sehingga areal tersebut menyimpan air yang dapat digunakan hingga periode irigasi berikutnya dilakukan. Sistem ini banyak diterapkan di Jepang dan Taiwan (Bhuiyan, 1980). Jumlah air yang diberikan dan interval irigasi adalah setara dengan unit luasan lahan yang diirigasi dan jumlah air yang hilang melalui evapotranspirasi, rembesan (*seepage*), perkolasi dan komponen kehilangan air lainnya.

Tabel 7. Efisiensi penggunaan air pada lahan yang dirigasi macak-macak dan digenangi terus-menerus (Abas dan Abdurachman, 1985)

Perlakuan	Efisiensi penggunaan air	
	MH 1980/81	MK 1980 dan 1981
	— kg gabah ha ⁻¹ mm ⁻¹ air ^a —	
Penggenangan ^b	1,97	2,96
Macak-macak	3,42	9,53

^a Gabah kering giling

^b Penggenangan terus-menerus setinggi 5 cm

Hasil penelitian di Taiwan menunjukkan bahwa teknik irigasi dengan sistem rotasi dapat menghemat penggunaan air 20-30% tanpa menyebabkan terjadinya penurunan hasil. Metode ini juga mendukung lebih baiknya pertumbuhan tanaman dan dapat meningkatkan efisiensi pemupukan dan penggunaan tenaga kerja (Wen *dalam* Bhuiyan, 1980). Hasil penelitian yang dilakukan di Nueva Ecija, Filipina juga menunjukkan bahwa pemberian air dengan sistem rotasi tidak menyebabkan terjadinya penurunan hasil, bahkan nampak adanya kecenderungan peningkatan hasil panen (Tabel 8).

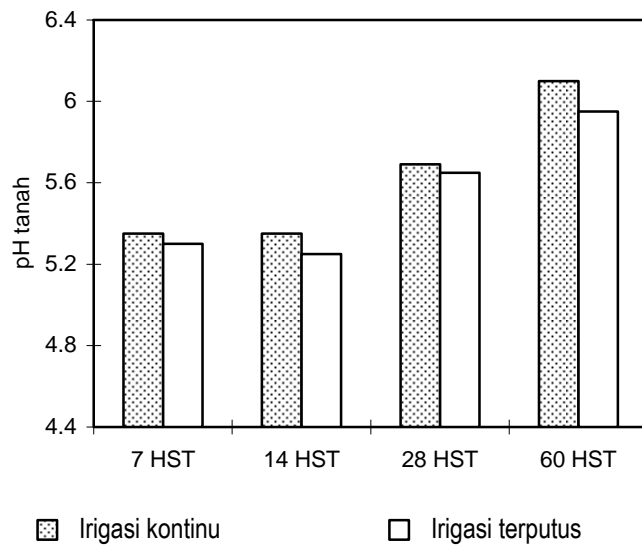
Meskipun efisiensi hasil padi yang dicapai pada lahan dengan irigasi bergilir lebih besar dibanding irigasi terus-menerus (*continue irrigation*), tetapi sistem ini memiliki beberapa kelemahan. Salah satunya adalah pengaruhnya terhadap reaksi tanah. Lahan yang di irigasi secara bergilir ini cenderung memiliki pH tanah yang lebih rendah dibanding pada lahan yang diirigasi secara terus-menerus dan digenangi, sebagaimana di laporkan oleh Kasno *et al.* (1999) dari hasil penelitiannya pada sawah bukaan baru di Desa Dwijaya, Kec. Tugumulyo, Kab. Musi Rawas, Sumatera Selatan (Gambar 9). Hal serupa dilaporkan juga oleh Adiningsih dan Sudjadi (1983).

Tabel 8. Rata-rata hasil padi dan efisiensi hasil di enam pilot area, Nueva Ecija, Filipina pada musim kemarau 1974 (Bhuiyan, 1980)

Lokasi penelitian	Hasil padi	Efisiensi hasil	
		Air hanya untuk pertumbuhan tanaman	Air untuk penyiapan lahan pertumbuhan tanaman
	t ha ⁻¹	— kg padi m ³ air ^{-1*} —	
Kaliwanangan			
- rotasi	3,67	0,22	0,13
- terus-menerus	3,66	0,20	0,12
Gomez	3,45	0,41	0,23
- rotasi	3,11	0,36	0,21

- terus-menerus			
Santa Arcadia	3,14	0,46	0,24
- rotasi	2,97	0,43	0,21
- terus-menerus			
Rata-rata	3,42	0,36	0,18
- rotasi	3,25	0,33	0,16
- terus-menerus			

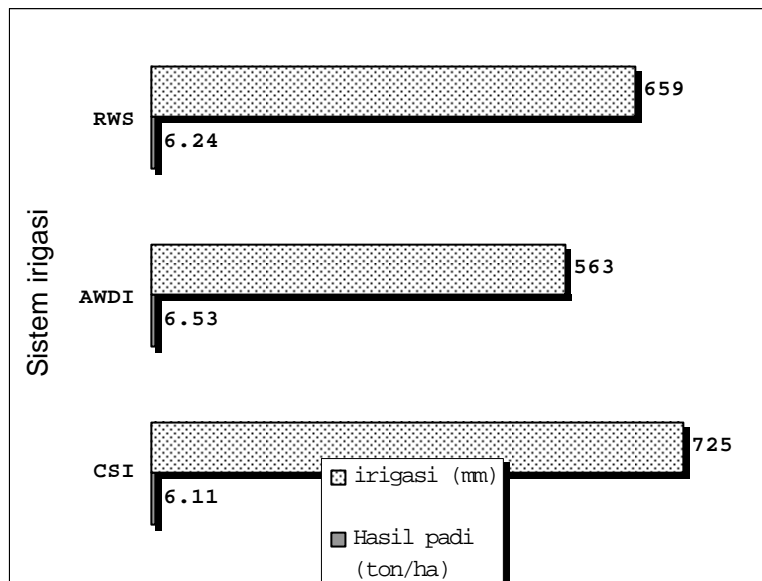
*Tidak menunjukkan perbedaan nyata pada taraf 5%.



Gambar 9. Pengaruh irigasi terhadap pH tanah (HST: hari setelah tanam)
Sumber: Kasno *et al.*(1999) dengan modifikasi

Irigasi berselang (*alternate wet/dry irrigation*)

Sistem irigasi berselang merupakan sistem pemberian air ke lahan sawah dengan level tertentu kemudian pemberian air berikutnya dilakukan pada periode tertentu setelah genangan air pada level tersebut surut hingga tidak terjadi genangan. Dalam penelitiannya di Maduari, Tamil Nadu, India, Krishnasamy *et al.* (2003) menerapkan irigasi setinggi 5 cm sehari setelah air surut hingga tidak terjadi genangan air di lahan sawah. Dengan sistem irigasi ini produktivitas padi (varietas ASD 19) dapat ditingkatkan, dan produksinya relatif lebih tinggi dibanding sistem irigasi terus-menerus dan irigasi bergilir (Gambar 10).



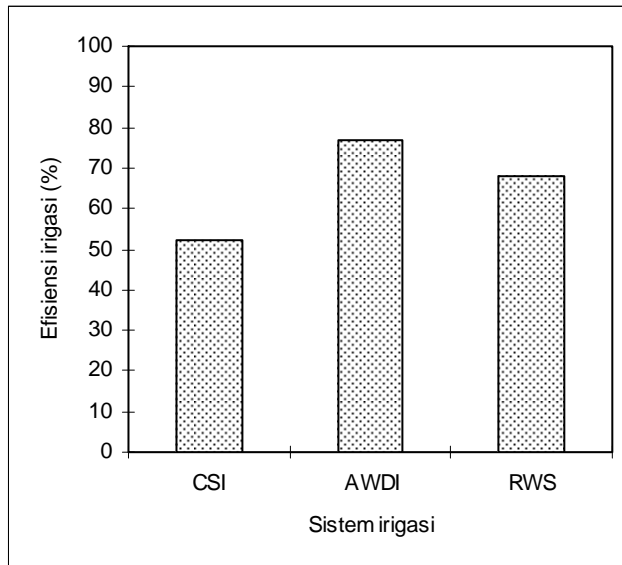
Gambar 10. Perbandingan hasil padi dan jumlah pemberian air irigasi pada sistem irigasi berselang dengan penggenangan dan irigasi bergilir (CSI: irigasi dengan genangan terus-menerus; AWDI: irigasi berselang-irigasi hingga 5 cm sehari setelah fase genangan; irigasi bergilir-4 hari irigasi 3 hari drainase; curah hujan selama periode irigasi 579 mm)

Sumber: Data dari Krishnasamy *et al.* (2003)

Dengan irigasi berselang hasil padi meningkat hampir 7% dibanding hasil pada lahan yang terus-menerus digenangi, sementara hasil padi dengan irigasi bergilir meningkat 2%. Kebutuhan air irigasi untuk sistem irigasi dengan penggenangan terus-menerus adalah sebesar 725 mm, sedangkan untuk irigasi bergilir dan berselang masing-masing adalah 659 mm dan 563 mm. Curah hujan selama periode irigasi adalah 579 mm (Krishnasamy *et al.*, 2003). Dari hasil penelitiannya di Tuanlin, Provinsi Hubei, China, Cabangon *et al.* (2002) melaporkan bahwa irigasi dengan penggenangan terus-menerus membutuhkan air yang lebih banyak, kemudian secara berurutan diikuti dengan irigasi berselang, sistem penjemuran pada bedengan, irigasi dengan penggelontoran (*flush irrigation*) pada lahan kering (tanah dalam kondisi aerobik), dan irigasi padi lahan tadah hujan. Irigasi berselang lebih tinggi kontribusinya dalam peningkatan jumlah anakan padi, lebar daun (*leaf area*) dan produksi biomassa Gani *et al.* (2002).

Irigasi dengan selang 4 hari merupakan batas kritis bagi kultivar padi IR-64, pengairan dengan selang >4 hari tersebut nyata menurunkan hasil gabah. Irigasi dengan selang 4 hari memberikan efisiensi penggunaan air paling tinggi yaitu 8,9 kg gabah mm ha⁻¹ (Budi, 2001).

Lebih jauh Krishnasamy *et al.* (2003) melaporkan bahwa produktivitas lahan pada sistem irigasi berselang lebih tinggi 6,73% dibanding penggenangan, dan dengan sistem tersebut penggunaan air irigasi dapat dihemat hingga 21% lebih tinggi dari sistem penggenangan. Efisiensi irigasi dengan sistem irigasi berselang mencapai 77%, lebih tinggi dibanding pada sistem penggenangan terus-menerus (52%) dan sistem irigasi bergilir (68%) (Gambar 11).



Gambar 11. Perbandingan efisiensi irigasi pada sistem irigasi berselang dengan penggenangan dan irigasi bergilir (CSI: irigasi dengan genangan terus-menerus; AWDI: irigasi berselang-irigasi hingga 5 cm sehari setelah fase genangan; irigasi bergilir-4 hari irigasi 3 hari drainase; curah hujan selama periode irigasi 579 mm)

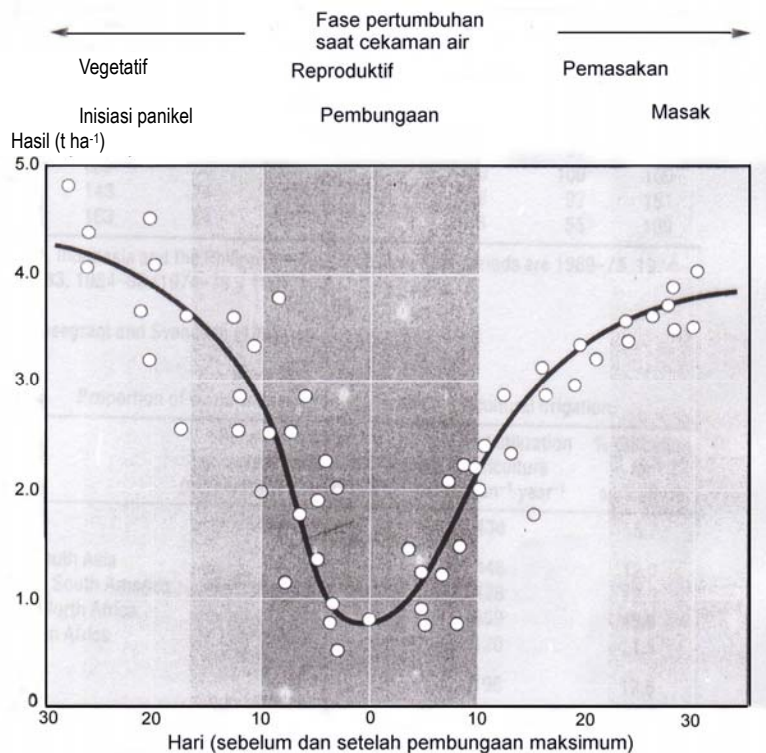
Sumber: Data dari Krishnasamy *et al.* (2003)

Sawah tadah hujan

Pada lahan sawah tadah hujan, pengolahan tanah dengan cara dilumpurkan (*puddling*) tidak dilakukan dan kebutuhan air untuk padi ladang dan padi sawah berbeda. Oleh karena itu pengelolaan air di lahan sawah tadah hujan harus dibedakan dengan yang dilakukan di lahan sawah beririgasi. Sistem penanaman termasuk didalamnya penentuan masa pengolahan tanah dan tanam harus diperhitungkan sehingga air hujan dapat dipergunakan secara efektif dan kebutuhan air untuk tanaman pada setiap fase pertumbuhannya dapat terpenuhi.

Cekaman air sering terjadi pada sawah tadah hujan akibat pengaturan

masa tanam yang kurang tepat, dan hal ini sangat berpengaruh terhadap hasil padi. Sumber air irigasi pada lahan sawah tadah hujan umumnya hanya mengandalkan curah hujan.



Gambar 12. Pengaruh cekaman air (*water stress*) terhadap hasil padi (O'toole, 1982 dalam Greenland (1997))

Widawsky and O'Toole (1990) dalam Wade (1999) melaporkan bahwa cekaman air (*water stress*) adalah faktor pembatas yang paling berpengaruh buruk pada produktivitas padi tadah hujan. Karena pengaruh buruk cekaman air, hasil padi rata-rata pada sawah tadah hujan hanya $1,1\ t\ ha^{-1}$ (IRRI, 1993a dalam Wade, 1999). Greenland (1997) melaporkan bahwa besarnya kehilangan hasil akibat kekurangan air sangat tergantung pada derajat cekaman air dan waktu kapan terjadi cekaman air tersebut. Kehilangan hasil akibat kekurangan air pada fase pembungaan jauh lebih besar dibanding kehilangan hasil akibat kekurangan air pada fase vegetatif (Gambar 12).

Penelitian IRRI sebagaimana dilaporkan oleh Reyes dan Wickham (1973), pada padi varietas IR-20 menunjukkan penurunan hasil sekitar 66% kalau air tidak diberikan pada periode reproduksi (63-102 hari setelah tanam). Kalau air tidak diberikan pada fase vegetatif (43-81 hari setelah tanam), penurunan hasil

hanya sebesar 30%. Ketika cekaman air berlangsung sampai masa panen, hasil panen menurun sampai 92% (Tabel 9).

Tabel 9. Hasil panen padi varietas IR-20 dengan empat perlakuan pemberian air (Reyes and Wickham, 1973)

Perlakuan pemberian air ¹⁾	Rata-rata hasil padi t ha ⁻¹	Penggunaan air ²⁾ mm	Efisiensi hasil kg padi mm air ⁻¹
Tanpa stress (<i>no stress</i>)	6,2	773	8,1
Stress awal (<i>early stress</i>)	4,4	788	5,6
Stress akhir (<i>late stress</i>)	2,0	806	2,6
Stress akhir-panen (<i>late stress to harvest</i>)	0,5	338	1,5

1) *no stress* = digenangi selama masa pertumbuhan, *early stress* = tanpa irigasi dari 43-81 hari setelah penyemaian, *late stress* = tanpa irigasi dari 63-102 hari setelah penyemaian, *late stress to harvest* = tanpa irigasi dari 63 hari setelah penyemaian sampai panen.

2) mulai dari penanaman (*transplanting*) sampai sekitar satu minggu sebelum panen. Termasuk semua curah hujan

Kendala-kendala penerapan teknologi irigasi umumnya mencakup penggunaan air yang belum efisien. Sebagian besar sistem irigasi yang diterapkan baik di lahan kering maupun di lahan sawah tidak efisien, disebabkan oleh antara lain kehilangan air melalui rembesan (*seepage*) di sepanjang saluran, dan aplikasinya yang masih boros.

Penerapan teknologi irigasi yang membutuhkan investasi cukup besar pada awal pembangunan jaringan irigasi belum diimbangi dengan pemilihan tanaman yang diusahakan. Petani masih sulit merubah pertanaman mereka, yang umumnya bukan tanaman-tanaman bernilai ekonomi tinggi. Dengan demikian investasi yang ditanam tidak sebanding dengan pendapatan yang mereka peroleh. Demikian juga sulit merubah pola tanam petani yang sudah mapan (*established*).

Kendala lain berkaitan dengan sumber air irigasi untuk peningkatan intensitas tanam. Sebagian besar lahan kering di Indonesia terletak di zona beriklim basah dimana curah hujannya >2.000 mm. Untuk memenuhi kebutuhan air bagi dua kali musim tanam (IP 200) curah hujan tersebut telah mencukupi, tetapi untuk peningkatan ke IP 300 harus disertai dengan suplai air tanah dengan pompanisasi. Selain itu penerapan teknologi panen air (*water harvesting*) untuk meningkatkan ketersediaan air untuk irigasi juga menjadi sangat penting.

Pemanenan air (*water harvesting*)

Sebagaimana pada pengelolaan tanaman lain di lahan kering, untuk tanaman padi pada lahan tadah hujan memerlukan irigasi untuk peningkatan

produktivitasnya. Sementara itu kebutuhan air untuk tanaman sangat tergantung pada curah hujan yang keberadaannya sangat dinamis tergantung pada kondisi iklim. Perubahan kondisi lahan akibat rusaknya fungsi hidrologi daerah aliran sungai (DAS) di mana sebagian besar lahan kering berada, berakibat pada hilangnya potensi sumber daya air untuk irigasi. Oleh karena itu diperlukan upaya untuk memanen air di musim hujan untuk dimanfaatkan pada musim kemarau sehingga mampu memperpanjang masa tanam.



Gambar 13. Embung mikro di Desa Tanjung Benuang, Kec. Pamenang, Kab. Merangin, Jambi

Foto: K. Subagyono

Beberapa teknologi panen air telah dikembangkan, di antara yang paling populer dan sudah dikenal dan diterapkan oleh petani adalah teknologi embung. Embung merupakan bangunan yang berfungsi selain sebagai pemanen aliran permukaan dan air hujan, juga sebagai tempat resapan yang akan meningkatkan kadar air tanah (Gambar 13). Tujuan pembuatan embung adalah untuk penyediaan air yang akan diaplikasikan di musim kemarau. Uraian mengenai embung dalam kaitannya dengan upaya memanen air telah diuraikan oleh Subagyono *et al.* (2005) dalam buku Teknologi Konservasi Tanah dan Air.

Pengembangan sawah tadah hujan secara luas telah dilakukan oleh Thailand terutama di kawasan lahan kering di utara negara tersebut. Untuk memanen air dan pendistribusiannya, telah dikembangkan teknologi yang dikenal

dengan *thamnop*. *Thamnop* merupakan bangunan semacam dam yang terbuat dari tanah umumnya dengan dimensi yang bervariasi yang dapat digunakan untuk mengairi lahan seluas 320 – 480 ha (Fukui and Hoshikawa, 2003).

Pemanfaatan air secara efisien

Tidak seperti lahan sawah beririgasi, publikasi mengenai pengelolaan air pada lahan sawah tadah hujan masih terbatas. Mengenai kebutuhan air untuk padi tadah hujan, banyak ahli berpendapat berbeda. Beberapa menyatakan bahwa kebutuhan air untuk padi tadah hujan lebih banyak dibanding tanaman sereal lain, tetapi beberapa yang lain berpendapat bahwa kebutuhan tersebut hampir sama. Penulis berpendapat sama dengan pendapat kedua, sehingga penerapan pengelolaan air pada lahan ini tidak jauh berbeda dengan pengelolaan air untuk tanaman semusim lain di lahan kering termasuk tanaman sereal, lebih-lebih jika pola tanam pada lahan ini mengintroduksi tanaman semusim lahan kering seperti jagung, kedelai, kacang hijau dan lain-lain.

Pada sawah tadah hujan, sumber air irigasi yang telah dipanen harus didistribusikan (dimanfaatkan) secara efisien. Sistem irigasi yang menggunakan air dalam jumlah terendah tetapi masih memberikan hasil yang optimum merupakan alternatif yang perlu dikembangkan. Jumlah air yang harus diaplikasikan dan interval irigasi didasarkan pada luas lahan yang akan diirigasi, evapotranspirasi, rembesan (*seepage*), kebutuhan untuk perkolasi dan kehilangan air yang mungkin terjadi di sepanjang saluran.

Irigasi dengan sistem bergilir (*rotational irrigation*) akan lebih efisien diterapkan dibanding dengan irigasi terus-menerus. Pengalaman IRRI bekerjasama dengan *Philippines national irrigation administration* menunjukkan bahwa irigasi bergilir yang diterapkan dengan rotasi 5 hari sekali mampu memberikan hasil padi yang lebih tinggi (meskipun secara statistik tidak berbeda nyata) dibanding irigasi terus-menerus (Bhuiyan, 1980). Pemberian air hingga macam-macam dapat dipertimbangkan, tetapi perlu dibarengi dengan upaya mengatasi masalah gulma. Untuk menanggulangi masalah gulma, pemberian air hingga level genangan setinggi 5-7 cm dapat menjadi alternatif yang efisien.

Khusus pada pertanaman padi sistem gogo rancah (Gora), dan jika pola tanam pada lahan tadah hujan mengintroduksi tanaman semusim lain seperti jagung, kedelai atau kacang hijau, maka strategi pengelolaan air didasarkan pada upaya memanfaatkan air secara efisien melalui irigasi dan peningkatan kelengasan tanah. Umumnya air irigasi diberikan jika kadar air tanah telah menurun hingga mencapai 50% air tersedia. Prinsip dasar ini tidak tepat diterapkan pada tanah-tanah liat yang memiliki sifat mengembang dan mengkerut dan tanah-tanah pasir (Withers *et al.*, 1974). Hal ini karena pada dasarnya tanah-tanah pasir mampu melepas air hingga 80% air tersedia sedangkan tanah-tanah

liat mampu menahan air cukup kuat (*high water holding capacity*). Faktor kedua yang dilupakan dan sering tidak dipertimbangkan dalam aplikasi irigasi adalah bahwa pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman tidak statis selama pertumbuhan tanaman. Aplikasi irigasi secara efisien harus didasarkan pada kedua faktor tersebut untuk memenuhi kebutuhan air bagi tanaman (*crop water use*).

Subagyono (1996) dan Panda dan Behera (2003) menggunakan konsep *management allowable depletion* (MAD) atau dikenal juga dengan *maximum allowable depletion* untuk merancang penjadwalan irigasi masing-masing pada tanaman jagung dan gandum. Dari penelitian tersebut dilaporkan, untuk tanaman jagung efisiensi penggunaan air irigasi (*water use efficiency*) tertinggi dicapai pada level MAD 75% pada tanah lempung berpasir dari Zeebrugge, Belgia dan untuk tanaman gandum dicapai pada level MAD 45% pada jenis tanah dengan tekstur yang sama di kebun percobaan *Indian Institute of Technology*, Kharagpur, India.

Management allowable depletion (MAD) atau *maximum allowable depletion* adalah batas penurunan maksimum kadar air yang masih memberikan kontribusi yang optimum terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman. Menurut James (1978) MAD dapat didefinisikan sebagai derajat kekeringan tanah yang masih diperbolehkan untuk menghasilkan produksi tanaman optimum. Untuk menentukan jumlah dan frekuensi pemberian air irigasi nilai kritis penurunan kadar air tersedia yang masih mampu menghasilkan efisiensi penggunaan air (*water use efficiency/WUE*) yang optimum sangat penting untuk ditetapkan.

Untuk penjadwalan irigasi, penetapan kadar air tersedia sangat diperlukan. Kadar air tersedia adalah kadar air antara kapasitas lapang dengan titik layu permanen. Penetapan kadar air pada saat kapasitas lapang setara pF 2,54 di laboratorium tidak tepat digunakan untuk semua jenis tanah, karena proses drainase internal dan dinamika retensi air tanah lebih dipengaruhi oleh komposisi seluruh profil tanah dari pada spesifik lapisan tertentu. Oleh karena itu drainase internal perlu ditetapkan di lapangan (Hillel, 1990) dengan menggunakan petak 1 m x 1 m dan tensiometer dipasang di tengah petakan sedalam 30 cm. Petakan diairi hingga jenuh, kemudian dibiarkan beberapa waktu hingga proses drainase internal terjadi. Kapasitas lapang tercapai jika potensial air tanah berubah menjadi relatif constant. Selanjutnya nilai konstan potensial air tanah dikonversi ke kadar air dengan menggunakan kurva pF yang telah ditetapkan sebelumnya. Sedangkan titik layu permanen (*permanent wilting point*) bisa dipertimbangkan konstan. Kapasitas air tersedia (*available water capacity/AWC*) ditetapkan dengan menghitung selisih nilai kadar air pada saat kapasitas lapang yang didapat dari percobaan drainase internal dengan saat titik layu permanen.

Kedalaman dan interval irigasi ditentukan berdasarkan data tensiometer

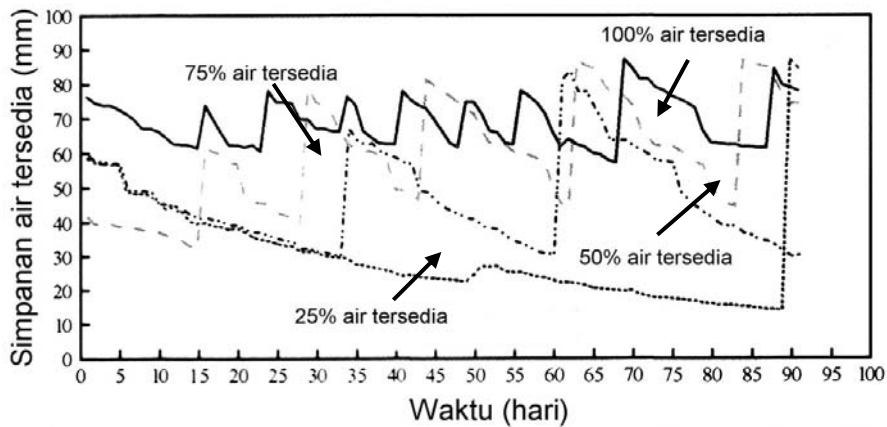
pada setiap pertumbuhan maksimum perakaran tanaman sebagai berikut:

$$W = ((\theta_{fc} - \theta_{MAD}) / 100) \times D \quad (6.16)$$

W adalah jumlah air yang ditambahkan (mm), θ_{fc} dan θ_{MAD} masing-masing adalah kadar air (% volume) pada kapasitas lapang dan kadar air pada level MAD, dan D adalah kedalaman akar (mm). Setelah level MAD tercapai (diindikasikan dengan potensial air pada setiap perlakuan), kemudian pemberian air irigasi dilakukan hingga batas kapasitas lapang. Untuk mendapatkan gambaran pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman yang akan digunakan untuk menentukan kedalaman air irigasi, pengamatan distribusi akar dilakukan pada setiap periode pertumbuhan tanaman.

Untuk mencari pada level MAD yang mana penjadwalan irigasi dilakukan, maka perlu diadakan percobaan lapang untuk menguji beberapa level MAD yang dikaitkan dengan pencapaian efisiensi penggunaan air (*water use efficiency/WUE*) yang paling tinggi. Sebagai gambaran, perlakuan level irigasi 20% air tersedia (20% MAD level), 40% air tersedia (40% MAD level), 60% air tersedia (60% MAD level) dan 80% air tersedia (80% MAD level) dapat diuji dalam hubungannya dengan efisiensi penggunaan air. Untuk memberikan pedoman yang lebih praktis dari metode di atas (karena petani tidak mungkin menggunakan tensiometer), maka dinamika perubahan potensial air tanah dari data tensiometer pada MAD level yang memberikan kontribusi maksimal pada efisiensi penggunaan air dikonversi ke berapa jumlah air yang diberikan (*irrigation depth*) dan berapa hari pemberian sekali irigasi tersebut harus dilakukan.

Dinamika perubahan kelengasan tanah terhadap waktu akibat penerapan irigasi digunakan sebagai dasar penjadwalan irigasi. Di lapangan, perubahan kelengasan tanah tersebut dapat diukur langsung dengan menggunakan alat pengukur kadar air seperti *neutron probe*, *time domain reflectometer* (TDR), secara grafimetrik, atau cara lain. Namun demikian penggunaan tensiometer memungkinkan untuk mendapatkan nilai tersebut dengan cara mengukur perubahan tegangan air tanah (menggunakan tensiometer baik manual maupun digital) kemudian dikonversi nilai tegangan air (matrik potensial) ke kadar air dengan menggunakan kurva pF atau kurva karakteristik air tanah. Data perubahan kadar air tanah tersebut dapat dikonversi ke simpanan air tersedia (*available water storage*) yang sangat penting di dalam perencanaan penjadwalan irigasi. Sebagai gambaran, pada Gambar 14 disajikan perubahan simpanan air tersedia sebagai pengaruh level irigasi dan mulsa.



Gambar 14. Pengaruh level irigasi terhadap perubahan simpanan air tersedia
Sumber: Subagyono and Verplancke (2001) dengan modifikasi

DAFTAR PUSTAKA

- Abas, A.I. 1980. Pengaruh pengelolaan air, pengelolaan tanah dan dosis pemupukan N terhadap pertumbuhan dan produksi padi (Effects of soil and water management and dosage of N fertilizer on growth and yield of rice). Kumpulan Makalah Pertemuan Teknis. Proyek Penelitian Tanah. Buku I Jilid ke-3. Pusat Penelitian Tanah. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.
- Abas, A.I. dan A. Abdurachman. 1981. Pengaruh pengelolaan air, pengelolaan tanah, dan pemupukan terhadap padi sawah (Effects of soil and water management and fertilizer on rice yield). Kumpulan Makalah Pertemuan Teknis. Proyek Penelitian Tanah. Buku II bagian 3. Pusat Penelitian Tanah. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.
- Abas, A.I. dan A. Abdurachman. 1985. Pengaruh pengelolaan air dan pengolahan tanah terhadap efisiensi penggunaan air padi sawah di Cihea, Jawa Barat. Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk 4: 1-6.
- Adiningsih, J.S. dan M. Sudjadi. 1983. Pengaruh penggenangan dan pemupukan terhadap tanah Podsolik Lampung Tengah. Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk 2: 1- 8.
- Allen, R.G. L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Guidelines for computing cropwater requirement. FAO Drainage and Irrigation Papar No. 56. Rome.

- Ambler, J.S. 1992. Dinamika Irigasi Petani: Kerangka dan prinsip-prinsip kelembagaan hlm. 3-29 *dalam* Ambler, J.S. (Ed.) Irigasi di Indonesia: Dinamika Kelembagaan Petani. Lembaga Penelitian, Pendidikan dan Penerangan Ekonomi dan Sosial (LP3ES). IKAPI. Jakarta.
- Bhuiyan, S.I. 1980. Water allocation, distribution, and use criteria for irrigation system design and management: selected research findings. p. 139-157. *In* IRRI (1980) Report of a Planning Workshop on Irrigation Water Management. International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Philippines.
- Blaney, H. F, and W. D. Criddle. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. ARS-USDA Tech. Bull. No. 1275.
- Budi, D.S. 2000. Strategi antisipasi kekeringan dalam budidaya tanaman padi sawah melalui teknik tabel, TOT dan pengelolaan air. hlm. *dalam* Amin (Eds.) Perubahan Penggunaan Lahan, Iklim dan Produktivitas Tanaman.
- Budi, D.S. 2001. Strategi peningkatan efisiensi pendistribusian air irigasi dalam sistem produksi padi sawah berkelanjutan. hlm. 116-128 *dalam* Prosiding Lokakarya Padi, Implementasi Kebijakan Strategies untuk Peningkatan Produksi Padi Berwawasan Agribisnis dan Lingkungan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor.
- Cabangon, G. Lu. R., T.P Tuong, P. Belder, B.A.M. Bouman, and E. Castillo. 2002. The effects of irrigation management on yield and water productivity of inbred, hybrid, and aerobic rice varieties. pp. 15-28. *In* Bouman B.A.M., H. Hengsdijk, B. Hardy, P.S. Bindraban, T.P. Tuong, and J.K. Ladha (Eds.) Water-wise Rice Production. International Rice Research Institute/IRRI and Plant Research International.
- Castillo EG, Buresh RJ, and Ingram KT. 1992. Lowland rice yield as affected by timing of water deficit and nitrogen fertilization. *Agron J.* 84: 152-159.
- Dikshit, U.N., D. Parida, and D. Satpathy. 1987. Genetic evaluation and utilization: Drought tolerance. IRRN 12: 6-7.
- Dorenboos, A.H. and Kassam. 1979. Yeild Response to Water. FAO Drainage and Irrigation Papar No. 33. Rome.
- Fukui, H. and Hoshikawa Keisuke. 2003. Earthen bund irrigation in Northeast Thailand. pp. 179-184. *In* Takara and Kojima (Eds.) Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and water Resources in Asia Pacific Region. Vol. 1. Pa-lu-lu Plaza, Kyoto, Japan, 13-15 March 2003.
- Gani, A., A. Rahman, Dahono, Rustam, and H. Hengsdijk. 2002. Synopsis of water management experiments in Indonesia. pp. 29-34. *In* Bouman

- B.A.M., H. Hengsdijk, B. Hardy, P.S. Bindraban, T.P. Tuong, and J.K. Ladha (*Eds.*) *Water-wise Rice Production*. International Rice Research Institute/IRRI and Plant Research International.
- Gardner, B.R, B.L. Blad, R.E. Maurer, and D.G. Watt. 1981. Relationship between crop temperature and physiological and phenological development of differentially irrigated corn. *Agron. J.* 73: 743-747.
- Ghosh, K. 2003. Overflow irrigation in Bengal: Lessons from the past. pp 172-178. *In* Takara and Kojima (*Eds.*) *Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and water Resources in Asia Pacific Region*. Vol. 1. Pa-lu-lu Plaza, Kyoto, Japan, 13-15 March 2003.
- Greenland, D.J. 1997. *The Sustainability of Rice Farming*. International Rice Research Institute. CAB International. 273 pp.
- Hillel, D. 1990. Role of irrigation in Agricultural systems. pp. 5-30. *In* B.A. Stewart and D.R. Nielsen (*Eds.*) *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy 30. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Ismail, I.G. dan S. Effendi. 1985. *Pertanaman Kedelai pada lahan kering*. hlm. *dalam* Somaatmadja (*Eds.*). *Jagung*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor.
- James, L.G. 1988. *Principle of Farm Irrigation System Design*. John Willey & Sons. Inc. New York.
- Kasno, A., Sulaeman dan Mulyadi. 1999. Pengaruh pemupukan dan pengairan terhadap Eh, pH, ketersediaan P dan Fe, serta hasil padi pada tanah sawah bukaan baru. *J. Tanah dan Iklim* 17: 72-81.
- Kitamura, Y., T. Yano, T. Honna, and S. Yamamoto. 2003. Irrigation-induced salinity problems and remedial measures in the Aral sea basin-Research on water management to prevent secondary salinization in rice based cropping systems in arid land. pp 631-637. *In* Takara and Kojima (*Eds.*) *Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and water Resources in Asia Pacific Region*. Vol. 2. Pa-lu-lu Plaza, Kyoto, Japan, 13-15 March 2003.
- Korten, F.F. 1992. Organisasi petani pemakai air: perbandingan kebijaksanaan antara Indonesia, Filipina, Malaysia, dan Muangthai. hlm. 30-54 *dalam* Ambler (*Ed.*) *Irigasi di Indonesia: Dinamika Kelembagaan Petani*. Lembaga Penelitian, Pendidikan dan Penerangan Ekonomi dan Sosial (LP3ES). IKAPI. Jakarta.
- Krishnasamy, S., F.P. Amerasinghe, R. Sakthivadivel, G. Ravi, S.C. Tewari, and W. van der Hoek. 2003. *Strategies for conserving water and effecting*

- mosquito vector control in rice ecosystems. International Water management Institute (IWMI). Working Paper 56. 21 pp.
- Kurnia, G. 2001. Efisiensi air irigasi untuk memperluas areal tanam. hlm. 137-142 *dalam* Agus, F., Kurnia, U. dan Nurmanaf, A.R. (Eds.). Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah. Bogor, 1 Mei 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Kurnia, U., D. Erfandi., S. Sutono, and H. Kusnadi. 2003. Penelitian Rehabilitasi dan Reklamasi Tanah Sawah Tercemar Limbah Industri Tekstil di Kabupaten Bandung. Bagian Proyek Penelitian Sumberdaya Tanah dan Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipatif (PAATP). Balai Penelitian Tanah. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian. 37 hlm.
- McCaskill, M. and I.K. Kariada. 1992. Comparison of five water stress predictors for the tropics. *Agric. Forest Meteorol.* 58: 35-42.
- Moorman, F.R., and N. Van Breemen. 1978. Rice: Soil, Water and Land. International Rice Research Institute. Los Banos. Philippines.
- Panda, R.K., and S.K. Behera. 2003. Effective management of irrigation water for wheat crop under deficit condition. Pp. 438-443. *In* Takara and Kojima (Eds.) Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and water Resources in Asia Pacific Region. Vol. 1. Pa-lu-lu Plaza, Kyoto, Japan, 13-15 March 2003.
- Penman, H. L. 1956. Estimating evaporation. *Trans. Amer. Geophys. Union.* 37: 43-46.
- Ramadhi. 2002. Identifikasi Pencemaran Lahan Sawah Akibat Limbah Industri Tekstil (Studi Kasus di Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung). Laporan Praktek Kerja Lapang pada Program Studi Analisis Lingkungan. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. IPB.
- Reyes and Wickham. 1973. The effect of moisture stress and nitrogen management at different growth stages on irrigation rice yields. Paper Presented at the 4th Scientific Meeting of the Crop Science Society of the Philippines, Cebu City.
- Schwab, G.O., and R.K. Flevert. 1981. Soil and Water Conservation Engineering. Wiley, New York. US.
- Subagyo, K. 1996. Water Use Efficiency and Available Water Capacity for Irrigated Corn in a Reclaimed Saline Soil. MSc-Thesis. International Training Center for Post-Graduate Soil Science. Faculty of Science. University of Gent. Belgium.

- Subagyono, K. And H. Verplancke. 2001. Dynamic behavior of soil water in a sandy loam soil under irrigated corn. Indonesian J. Agric. Sci. 1: 17-24.
- Subagyono, K., Abdurachman, A. and Nata Suharta. 2001. Effects of Puddling Various Soil Types by Harrows on Physical Properties of New Developed Irrigated Rice Areas in Indonesia. Proceeding of the Meeting of Indonesian Student Association, Tokyo. Japan.
- Subagyono, K., U. Haryati, dan S. H. Tala'ohu. 2005. Teknologi Konservasi Air pada Pertanian di Lahan Kering. Diusulkan sebagai salah satu bab *dalam* Buku Konservasi Tanah dan Air.
- Sukmana, S., H. Suwardjo, A. Abdurachman, and J. Dai. 1985. Prospect of *Flemingia congesta* Roxb. For Reclamation and Conservation of Volcanic Skeletal Soils. Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk No. 4: 50-54.
- Tase. N., S. Yabusaki, and S. Ioka. 2003. The comparative study of groundwater in humid and arid regions. pp. 191-196. *In* Takara and Kojima (*Eds.*) Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and water Resources in Asia Pacific Region. Vol. 1. Pa-lu-lu Plaza, Kyoto, Japan, 13-15 March 2003.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55-94.
- Wade, L.J. 1999. Critical characteristics of rainfed rice environments and implications for rice improvement. pp. 1-10. *In* Otoole, J. and B. Hardy (*Eds.*). Genetic Improvement of Rice for Water Limited Environments. International Rice Research Institute. Los Banos, Laguna, Philippines.
- Vergara, S.B. 1976. Physiological and morphological adaptability of rice varieties to climate. *In* *Climate and Rice*. IRRI, Philippines.
- Withers, B. and S. Vipond. 1974. Irrigation: Design and practice. pp. 73-74. Bastford Academic and Educational Limited. London.
- Yoshida, S. 1981. Fundamentals of Rice Crop Science. International Rice Research Institute. Loas Banos, Laguna, Phillipines. 269 p.

8. PELUANG PERLUASAN LAHAN SAWAH

Sofyan Ritung, Anny Mulyani, Budi Kartiwa, dan H. Suhardjo

Penduduk Indonesia dari tahun ke tahun semakin bertambah, dengan pertumbuhan sekitar 1,6% tahun⁻¹, sehingga mendorong permintaan pangan terus meningkat. Sementara lahan pertanian khususnya lahan sawah, yang luasnya mencapai 7,75 juta ha (BPS, 2002) ternyata belum mampu memenuhi kebutuhan pangan Indonesia terutama beras, jagung, dan kedelai, sehingga perlu ditambah dengan impor yang pada dekade terakhir jumlahnya meningkat. Swastika *et al.* (2000) memproyeksikan pada tahun 2010 impor beras, kedelai, dan jagung masing-masing akan mencapai 13; 1,8 dan 1,5 juta ton.

Lahan sawah merupakan penghasil utama beras. Sebagai gambaran, pada tahun 2003 dari total luas panen padi sekitar 11,5 juta ha dengan produksi padi sebesar 52,1 juta ton, ternyata 49,3 juta ton padi diantaranya dihasilkan dari lahan sawah (94,7%) dengan luas panen 10,4 juta ha dan sisanya 2,8 juta ton (5,3%) dari lahan kering dengan luas panen 1,1 juta ha. Rata-rata produktivitas padi sawah 4,7 t ha⁻¹ dan padi ladang 2,5 t ha⁻¹ (BPS, 2003).

Khusus untuk Pulau Jawa, bila dibandingkan data produksi padi pada tahun 1981 (BPS, 1983), 1991 (BPS, 1993) dan 2001 (BPS, 2002), ternyata kontribusi produksi lahan sawah mengalami penurunan yaitu masing-masing sebesar 62,6% pada tahun 1981, 60,4% pada tahun 1991, dan 57% pada tahun 2001 (BPS, 1983; 1993; dan 2002). Penurunan persentase kontribusi produksi padi di Pulau Jawa ini karena luas lahan sawah dan luas panen di luar Jawa cenderung meningkat, sedangkan di Jawa relatif tetap, bahkan luas baku lahan sawah di Pulau Jawa menurun sebesar 359.885 ha dari tahun 1981 ke tahun 2001, yang terdiri atas 67.216 ha pada 10 tahun pertama dan 292.669 ha pada 10 tahun kedua. Pada periode 1981-1999, telah terjadi konversi lahan sawah nasional seluas 1.627.514 ha; yang mana sekitar 1 juta ha (61,6%) diantaranya terjadi di Jawa (Irawan *et al.*, 2001). Walaupun selama kurun waktu tersebut pencetakan sawah baru di Jawa mencapai 518.224 ha dan di luar Jawa 2.702.939 ha, namun impor beras tetap tinggi, yaitu 1,8 juta ton pada tahun 2002 (BPS, 2002). Penurunan luas baku lahan sawah di Pulau Jawa menunjukkan bahwa telah terjadi konversi lahan sawah produktif ke lahan nonpertanian (permukiman, perkotaan dan infrastruktur, serta kawasan industri).

Jawa makin sulit diandalkan sebagai pemasok pangan nasional, karena: (1) alih fungsi; (2) pemenuhan kebutuhan di Jawa sendiri; dan (3) menurunnya kecukupan air untuk pertanaman padi. Menurut Las *et al.* (2000), pada tahun

2000 Jawa surplus padi 4 juta ton, namun pada tahun 2010 surplus padi diperkirakan hanya sebesar 0,26 juta ton. Sementara di luar Jawa, meskipun permintaan pangan juga terus meningkat perkembangannya masih lambat. Maka kecenderungan menurunnya laju peningkatan produksi padi, pertumbuhan produksi padi diperkirakan tidak akan mampu memenuhi permintaan, karena penurunan surplus di Jawa.

Berdasarkan Atlas Sumber daya Tanah Eksplorasi Indonesia skala 1:1.000.000, luas wilayah Indonesia mencakup 188,2 juta ha (Puslitbangtanak, 2000). Dari total luas tersebut, 148,2 juta ha di antaranya berupa lahan kering dan sisanya 40 juta ha lahan basah. Dari 40 juta ha lahan basah tersebut, sebagian besar berupa hutan, semak belukar dan rumput rawa yang belum dimanfaatkan, dan berada pada lahan gambut, pasang surut ataupun lebak. Sedangkan sebagian kecil sudah berupa sawah yaitu sawah irigasi, sawah tadah hujan, sawah pasang surut, dan sawah lebak, dengan total luas 7,75 juta ha (BPS, 2002), serta perkebunan kelapa, kelapa sawit, dan hutan tanaman industri (HTI).

Berdasarkan kondisi lahan sawah tersebut, perlu suatu terobosan baru kelembagaan untuk mengatasi terbatasnya penyediaan pangan nasional terutama beras, melalui intensifikasi dan pemacuan teknologi yang telah dihasilkan. Dalam jangka panjang perluasan areal lahan sawah mutlak perlu dilaksanakan secara terkendali dan bijaksana, terutama untuk mengganti lahan-lahan sawah produktif yang dikonversi dan mengoptimalkan lahan sawah bukaan baru.

Definisi dan tipologi lahan sawah

Lahan sawah adalah suatu tipe penggunaan lahan, yang untuk pengelolaannya memerlukan genangan air. Oleh karena itu sawah selalu mempunyai permukaan datar atau yang didatarkan (dibuat teras), dan dibatasi oleh pematang untuk menahan air genangan (Puslitbangtanak, 2003). Berdasarkan sumber air yang digunakan dan keadaan genangannya, sawah dapat dibedakan menjadi sawah irigasi, sawah tadah hujan, sawah lebak, dan sawah pasang surut.

Sawah irigasi - adalah sawah yang sumber airnya berasal dari tempat lain melalui saluran-saluran yang sengaja dibuat untuk itu. Sawah irigasi dibedakan atas sawah irigasi teknis, sawah irigasi setengah (semi) teknis, dan sawah irigasi sederhana. Sawah irigasi teknis air pengairannya berasal dari waduk, dam atau danau dan dialirkan melalui saluran induk (primer) yang selanjutnya dibagi-bagi ke dalam saluran-saluran sekunder dan tersier melalui bangunan pintu-pintu pembagi. Sawah irigasi sebagian besar dapat ditanami padi dua kali atau lebih setahun, tetapi sebagian ada yang hanya dapat ditanami padi sekali setahun bila ketersediaan air tidak mencukupi terutama yang terletak di ujung-ujung saluran primer dan jauh dari sumber airnya. Sawah irigasi teknis dan setengah teknis

dibedakan berdasarkan sistem pengelolaan jaringan irigasinya. Irigasi teknis seluruh jaringan irigasi dikuasai dan dipelihara oleh pemerintah, sedangkan irigasi setengah teknis pemerintah hanya menguasai bangunan penyadap untuk dapat mengatur dan mengukur pemasukan air. Irigasi sederhana adalah pengairan yang sumber airnya dari tempat lain (umumnya berupa mata air) dan salurannya dibuat secara sederhana oleh masyarakat petani setempat, tanpa bangunan-bangunan permanen.

Sawah tadah hujan - adalah sawah yang sumber airnya tergantung atau berasal dari curah hujan tanpa adanya bangunan-bangunan irigasi permanen. Sawah tadah hujan umumnya terdapat pada wilayah yang posisinya lebih tinggi dari sawah irigasi atau sawah lainnya sehingga tidak memungkinkan terjangkau oleh pengairan. Waktu tanam padi akan sangat tergantung pada datangnya musim hujan.

Sawah pasang surut - adalah sawah yang irigasinya tergantung pada gerakan pasang dan surut serta letaknya di wilayah datar tidak jauh dari laut. Sumber air sawah pasang surut adalah air tawar sungai yang karena adanya pengaruh pasang dan surut air laut dimanfaatkan untuk mengairi melalui saluran irigasi dan drainase. Sawah pasang surut umumnya terdapat di sekitar jalur aliran sungai besar yang terkena pengaruh pasang surut air laut. Pada lahan pasang surut dibedakan empat tipologi lahan berdasarkan jangkauan luapan air pasang, yaitu tipe luapan A, B, C dan D (Noorsyamsi *et al.*, 1984 dalam Subagjo, 1998). Tipe luapan A dan B mempunyai potensi untuk persawahan karena dapat terjangkau air pasang dan biasanya terdapat lebih dekat ke pantai, namun mempunyai kendala potensi kemasaman tanah atau salinitas tinggi. Sedangkan tipe luapan C dan D karena posisinya lebih tinggi dan jangkauan air pasang lebih terbatas, sehingga potensinya lebih sesuai untuk tegalan atau tanaman tahunan.

Sawah lebak - adalah sawah yang diusahakan di daerah rawa dengan memanfaatkan naik turunnya permukaan air rawa secara alami, sehingga di dalam sistem sawah lebak tidak dijumpai sistem saluran air. Sawah ini umumnya terdapat di daerah yang relatif dekat dengan jalur aliran sungai besar (permanen) yaitu di *backswamp* atau rawa belakang dengan bentuk wilayah datar agak cekung, kondisi drainase terhambat sampai sangat terhambat, permukaan air tanah dangkal bahkan hingga tergenang dimusim penghujan, selalu terkena luapan banjir atau kebanjiran dari sungai didekatnya selama jangka waktu tertentu dalam satu tahun. Oleh karena itu sawah ini baru dapat ditanami padi setelah air genangan menjadi dangkal (surut), dan terjadi umumnya pada musim kemarau. Lahan lebak demikian digolongkan sebagai lebak dalam jika terletak di sebelah dalam, topografi cekung, tergenang relatif dalam dan terus-menerus, sedangkan lebak tengahan pada transisi antara lebak dalam dan lebak pematang (Direktorat Rawa, 1984). Di daerah lebak dangkal atau tergolong sebagai lebak pematang umumnya dapat ditanami padi dua kali, sedangkan di lebak dalam hanya ditanami padi sekali setahun.

Kesesuaian dan potensi lahan

Potensi lahan basah

Lahan basah yang sesuai dan potensial untuk pengembangan lahan sawah di masa depan dihitung berdasarkan pendekatan karakteristik lahan yang tertera dalam database dan Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia skala 1.000.000 (Puslitbangtanak, 2000), dan Arahana Tata Ruang Pertanian Nasional skala 1:1.000.000 (Puslitbangtanak, 2001). Berdasarkan data sumber daya tanah eksplorasi skala 1:1.000.000, total daratan Indonesia sekitar 188,2 juta ha. Berdasarkan karakteristik lahan yang terdiri atas fisiografi, topografi, dan tanah, maka lahan tersebut dapat dikelompokkan menjadi lahan basah dan lahan kering.

Tanah-tanah yang termasuk pada lahan basah adalah sebagian besar ordo Histosols terutama yang belum direklamasi, dan semua tanah mineral yang tergenang atau berdrainase buruk yang dicirikan oleh warna tanah kelabu atau bersifat akuik. Sisanya yang tidak termasuk pada kriteria lahan basah akan termasuk pada lahan kering. Berdasarkan hal tersebut, diperoleh luas lahan basah sekitar 39,3 juta ha dan lahan kering seluas 148,9 juta ha (Tabel 1).

Tabel 1. Pengelompokan lahan basah dan lahan kering di Indonesia (x 1.000 ha)

Provinsi/pulau	Lahan basah	Lahan kering	Total
Nangroe Aceh Darussalam	788	4.841	5.629
Sumut	918	6.262	7.180
Sumbar	422	3.922	4.344
Riau	4.737	4.921	9.658
Jambi	1.130	3.674	4.804
Sumsel (dan Babel)	3.301	6.943	10.244
Bengkulu	121	1.920	2.041
Lampung	401	2.940	3.341
<i>Sumatera</i>	<i>11.819</i>	<i>35.422</i>	<i>47.241</i>
DKI	38	48	86
Jabar (+ Banten)	573	4.013	4.586
Jateng	384	3.081	3.465
DIY	15	314	329
Jatim	580	4.164	4.744
<i>Jawa</i>	<i>1.590</i>	<i>11.620</i>	<i>13.210</i>
Bali	66	493	559
NTB	42	1.979	2.021
NTT	88	4.541	4.629
<i>Bali dan Nusa Tenggara</i>	<i>196</i>	<i>7.013</i>	<i>7.209</i>
Kalbar	3.019	11.743	14.762
Kalteng	3.202	11.901	15.103
Kalsel	1.186	2.537	3.723
Kaltim	2.093	17.209	19.302
<i>Kalimantan</i>	<i>9.501</i>	<i>43.389</i>	<i>52.890</i>
Sulut (dan Gorontalo)	192	2.420	2.612
Sulteng	445	5.783	6.228
Sulse	874	5.348	6.222
Sultra	505	3.176	3.681
<i>Sulawesi</i>	<i>2.015</i>	<i>16.728</i>	<i>18.743</i>
Maluku (dan Maluku Utara)	748	7.069	7.817
Papua	13.396	27.709	41.105
<i>Papua dan Maluku</i>	<i>14.144</i>	<i>34.778</i>	<i>48.922</i>
Total	39.265	148.950	188.215

Sumber: Data diolah dari Atlas Sumber daya Tanah Eksplorasi Indonesia (Puslitbangtanak, 2000).

Tabel 1 memperlihatkan bahwa lahan basah sebagian besar terdapat di Papua, Sumatera, dan Kalimantan, yang luasnya berturut-turut 14,1 juta ha, 11,8 juta ha, dan 9,5 juta ha. Di Sumatera, lahan basah sebagian besar terdapat di Riau dan Sumatera Selatan (Sumsel), sedangkan di Kalimantan sebagian besar di Kalimantan Tengah (Kalteng) dan Kalimantan Barat (Kalbar). Dari 39,3 juta ha lahan basah tersebut, kemungkinan besar sudah termasuk sebagian lahan sawah yang telah ada sekarang, baik berupa sawah irigasi, sawah tadah hujan, sawah pasang surut, maupun sawah lebak, yang total luasnya 7,49 juta ha (BPS, 2002).

Tabel 2. Luas lahan basah berdasarkan grup tanah, bahan induk dan *landform*

Komposisi		Bahan induk	<i>Landform</i>	Luas tanah (x1.000 ha)	
Tanah 1	Tanah 2			Mineral	Gambut
Haplohemists	Haplofibrists	Organik	Kubah gambut		2.752
Haplohemists	Haplosaprists	Organik	Kubah gambut		4.184
Haplohemists	Sulfihemists	Organik	Dataran gambut		4.975
Endoaquents	Haplohemists	Aluvium&organik	Dataran pasang surut	3.016	2.011
Hydraquents	Sulfaquents	Aluvium	Dataran pasang surut	3.200	
Endoaquepts	Endoaquents	Aluvium	Dataran pasang surut	1.308	
Endoaquepts	-	Aluvium	Dataran pasang surut	303	
-	Endoaquents	Aluvium	Pesisir pantai	592	
Plinthaquults	-	Aluvium	Teras marin	799	
			Delta atau dataran		
Endoaquepts	Sulfaquents	Aluvium	estuarin	2.224	
Endoaquepts	Sulfaquents	Aluvium	Rawa belakang	653	
Endoaquepts	Haplohemists	Aluvium&organik	Basin aluvial (lakustrin)	1.003	668
Endoaquepts	Endoaquents	Aluvium	Basin aluvial (lakustrin)	83	
Endoaquepts	-	Aluvium	Basin aluvial (lakustrin)	54	
Endoaquepts	-	Aluvium	Jalur aliran sungai	1.540	
Endoaquepts	-	Aluvium	Jalur aliran sungai	2.765	
-	Endoaquepts	Aluvium	Dataran antar perbukitan/pegunungan	404	
Endoaquepts	Endoaquents	Aluvium	Dataran aluvio-koluvial	409	
Sulfaquepts	Sulfaquents	Aluvium	Dataran aluvial	400	
Endoaquepts	Endoaquents	Aluvium	Dataran aluvial	874	
Endoaquepts	-	Aluvium	Dataran aluvial	3.573	
Endoaquepts	-	Aluvium	Dataran aluvial	140	
-	Endoaquepts	Aluvium	Dataran aluvial	103	
-	Endoaquepts	Aluvium	Dataran aluvial	458	
-	Endoaquepts	Sedimen	Dataran tektonik	28	
-	Humaquepts	Sedimen	Dataran tektonik	369	
-	Endoaquepts	Volkanik	Dataran volkan	10	
Endoaquerts	Endoaquepts	Volkanik	Dataran volkan	336	
-	Endoaquepts	Volkanik	Dataran volkan	31	
Jumlah				24.676	14.590

Sumber: Data diolah dari Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia (Puslitbangtanak, 2000).

Keterangan:

- Tanah 1: mempunyai proporsi luasan dianggap 60%.
- Tanah 2: mempunyai proporsi luasan dianggap 40%.
- -: tidak terdapat tanah yang tergolong bersifat akuik.

Lahan basah tersebut terdiri atas tanah mineral dan tanah organik sesuai dengan bahan induk tanahnya. Bahan induk tanah umumnya berasal dari bahan aluvium dan bahan organik, yang terdapat pada *landform* dataran aluvial, dataran pasang surut, jalur aliran sungai dan kubah gambut. Lahan basah yang berasal dari tanah mineral mencapai luas 24,7 juta ha dan sisanya berasal dari bahan organik seluas 14,6 juta ha (Tabel 2). Sedangkan berdasarkan jenis tanahnya, lahan basah yang berasal dari bahan tanah mineral adalah Entisol, Inceptisol, Ultisol, dan Vertisol, dan yang berasal dari bahan organik adalah Histosol.

Tabel 3. Penyebaran ordo tanah di lahan basah per provinsi (x 1000 ha)

Provinsi/pulau	Entisol	Histosol	Inceptisol	Ultisol	Vertisol	Total
Nangroe Aceh Darussalam	166	263	359			788
Sumut	205	236	478			919
Sumbar	101	119	202			422
Riau	229	3.881	627			4.737
Jambi	221	634	275			1.130
Sumsel	991	1.442	634			3.067
Bengkulu	37	30	55			122
Lampung	170	2	229			401
Bangka Belitung	151	18	65			234
<i>Sumatera</i>	<i>2.271</i>	<i>6.625</i>	<i>2.924</i>			<i>11.820</i>
DKI	17		21			38
Jabar	192		232			424
Jateng	139		217		28	384
DIY	8		7			15
Jatim	105		190		285	580
Banten	59		92			151
<i>Jawa</i>	<i>520</i>		<i>759</i>		<i>313</i>	<i>1.592</i>
Bali	3		28		24	55
NTB	1		17		24	42
NTT	11		53		16	80
<i>Bali dan Nusa Tenggara</i>	<i>15</i>		<i>98</i>		<i>64</i>	<i>177</i>
Kalbar	588	1.732	699			3.019
Kalteng	385	1.987	830			3.202
Kalsel	446	165	575			1.186
Kaltim	828	695	570			2.093
<i>Kalimantan</i>	<i>2.247</i>	<i>4.579</i>	<i>2.674</i>			<i>9.500</i>
Sulut	57	3	40			100
Sulteng	149	37	254		6	446
Suisel	301	142	351		80	874
Sultra	150	43	312			505
Gorontalo	33	7	39		12	91
<i>Sulawesi</i>	<i>690</i>	<i>232</i>	<i>996</i>		<i>98</i>	<i>2.016</i>
Maluku	254	23	197		1	475
Papua	3.728	3.104	6.084	480		13.396
Maluku Utara	83	27	164			274
<i>Papua dan Maluku</i>	<i>4.065</i>	<i>3.154</i>	<i>6.445</i>	<i>480</i>	<i>1</i>	<i>4.145</i>
Indonesia	9.808	14.590	13.896	480	476	39.250

Sumber: Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia (Puslitbangtanak, 2000). Luas tanah yang termasuk pada lahan basah diolah berdasarkan klasifikasi tanah tingkat (*great*) grup.

Perhitungan luas lahan basah dengan pendekatan tanah seperti di atas

mempunyai kelemahan, diantaranya lahan-lahan sawah irigasi atau tadah hujan yang ada saat ini, terutama yang berada pada tanah yang tidak mempunyai rezim kelembapan akuik, tidak diperhitungkan. Sebagai gambaran, luas lahan basah di Jawa sekitar 1,59 juta ha (Tabel 1), padahal berdasarkan BPS (2002) luas lahan sawah yang ada di Jawa pada tahun 2002 3,32 juta ha. Jadi, sekitar 1,7 juta ha lahan sawah tidak termasuk pada kriteria lahan basah. Demikian juga bila dilihat dari Tabel 3, lahan basah di Sumatera tidak terdapat dari ordo Ultisol, dan di Pulau Jawa lahan basah dari ordo Vertisol yang terdeteksi relatif sangat kecil luasannya.

Dari Tabel 3 terlihat bahwa tanah-tanah mineral lahan basah yang dominan adalah Inceptisols dan Entisols, sebagian besar terdapat di Papua, Kalimantan, dan Sumatera. Sedangkan untuk tanah organik (Histosols) sebagian besar terdapat di Sumatera (Riau dan Sumsel), Kalimantan (Kalbar dan Kalteng), serta di Papua. Tanah lainnya adalah Ultisol dan Vertisol sangat kecil luasannya yang dapat terdeteksi dari data Atlas Sumberdaya Tanah tersebut. Oleh karena itu, di masa yang akan datang perlu adanya *database* sumber daya lahan dari data/peta yang lebih besar skalanya, sehingga dapat diperoleh data yang lebih detail dan akurat.

Kesesuaian lahan

Berdasarkan data dari Atlas Arah Tataruang Pertanian Nasional (Puslitbangtanak, 2001), lahan-lahan yang termasuk pada lahan basah dikelompokkan lebih lanjut dan dievaluasi kesesuaian lahannya untuk sawah, dengan mempertimbangkan beberapa faktor seperti karakteristik lahan (fisiografi, topografi, bahan induk, dan tanah), ketinggian tempat (dataran rendah <700 m dpl. dan dataran tinggi ≥ 700 m dpl.), serta iklim. Iklim dibedakan berdasarkan zona agroklimat (Oldeman *et al.*, 1980) menjadi wilayah beriklim basah (zona agroklimat A, B, C) dan beriklim kering (zona agroklimat D, E, F).

Dari total lahan basah seperti disajikan pada Tabel 2, ternyata lahan yang sesuai untuk sawah di Indonesia mencapai luas 24,56 juta ha (61% dari total lahan basah), yang terdiri atas 23,26 juta ha (94,7%) berada pada dataran rendah, dan 1,30 juta ha (5,3%) berada pada dataran tinggi (Tabel 3). Jika berdasarkan kondisi iklimnya, maka lahan basah yang sesuai tersebut sebagian besar berada pada wilayah beriklim basah yaitu seluas 20,8 juta ha (84,7%), sedangkan sisanya hanya 3,76 juta ha (15,3%) berada pada wilayah beriklim kering. Hal ini dapat dimengerti mengapa lahan sawah di dataran tinggi sangat sedikit, karena lahan di dataran tinggi umumnya mempunyai bentuk wilayah bergelombang hingga berbukit-bergunung dan berupa lahan kering. Begitu juga pada wilayah beriklim kering, wilayah yang sesuai untuk lahan sawah sangat sedikit, hal ini berkaitan dengan keadaan biofisik lahan dan ketersediaan air yang terbatas (curah hujan rendah, zona agroklimat D, E, F).

Tabel 4. Luas lahan potensial untuk pengembangan sawah di Indonesia

Provinsi/pulau	Lahan sesuai			Sawah	Lahan
	Dataran rendah (<700 m dpl.)	Dataran tinggi (700- 1.000 m dpl.)	Jumlah	BPS (2002)	potensial
	x 1000 ha				
NAD	540	62	602	289	313
Sumut	924	164	1.088	471	617
Sumbar	472	130	602	244	358
Riau	785		785	112	673
Jambi	561	31	592	128	464
Sumsel	1.405	11	1.416	459	957
Babel	107		107	2	105
Bengkulu	146	31	177	88	89
Lampung	676	6	681	311	370
<i>Sumatera</i>	<i>5.615</i>	<i>435</i>	<i>6.049</i>	<i>2.104</i>	<i>3.945</i>
DKI Jakarta	11		11	3	8
Jabar	956	233	1.189	913	276
Banten	211	3	214	209	5
Jateng	1.364	139	1.503	986	517
DI Yogyakarta	101		101	58	43
Jatim	1.511	57	1.568	1.146	422
<i>Jawa</i>	<i>4.155</i>	<i>432</i>	<i>4.587</i>	<i>3.315</i>	<i>1.272</i>
Bali	117	12	129	82	47
NTB	154		154	218	-64
NTT	167	32	199	120	79
<i>Bali dan NT</i>	<i>438</i>	<i>44</i>	<i>482</i>	<i>413</i>	<i>69</i>
Kalbar	567		567	299	268
Kalteng	1.097		1.097	169	928
Kalsel	902		902	420	482
Kaltim	442	5	447	120	327
<i>Kalimantan</i>	<i>3.008</i>	<i>5</i>	<i>3.013</i>	<i>1.008</i>	<i>2.005</i>
Sulut	103	25	127	64	63
Gorontalo	82	1	83	22	61
Sulteng	504	110	614	121	493
Sulse	1.159	23	1.182	629	553
Sultra	370	10	380	65	315
<i>Sulawesi</i>	<i>2.218</i>	<i>168</i>	<i>2.386</i>	<i>901</i>	<i>1.485</i>
Papua	7.212	198	7.410	0	7.410
Maluku	293	20	312	0	312
Maluku Utara	318	0	318	0	318
<i>Maluku dan Papua</i>	<i>7.823</i>	<i>218</i>	<i>8.040</i>	<i>0</i>	<i>8.040</i>
Indonesia	23.257	1.302	24.557	7.741	16.816

Catatan: Perhitungan luas lahan sesuai didasarkan pada Atlas Arahan Tata Ruang Pertanian Indonesia skala 1:1.000.000 (Puslitbangtanak, 2001), sedangkan lahan potensial berdasarkan luas lahan sesuai dikurangi luas sawah yang ada (BPS, 2002)

Penyebaran lahan sesuai untuk sawah tersebut, sebagian besar terdapat di Papua, Sumatera dan Jawa, masing-masing 8,04 juta ha, 6,05 juta ha, dan 4,59 juta ha. Di Sumatera, lahan yang sesuai untuk sawah sebagian besar terdapat di Provinsi Sumsel, Sumatera Utara (Sumut), dan Riau. Di Jawa sebagian besar terdapat di Jawa Timur (Jatim), Jawa Tengah (Jateng), dan Jawa Barat (Jabar), sedangkan di Kalimantan terdapat di Kalimantan Tengah (Kalteng) dan Kalimantan Timur (Kaltim). Di Sulawesi, sebagian besar terdapat di Sulawesi

Selatan (Sulsel) dan Sulawesi Tengah (Sulteng). Di Papua, lahan yang sesuai untuk sawah sangat luas, sebaliknya di Maluku, Bali, Nusa Tenggara Barat (NTB), dan Nusa Tenggara Timur (NTT) lahan sesuai untuk sawah hanya sedikit (Tabel 4). Walaupun menunjukkan angka yang cukup luas seperti di Jawa, Sulsel dan Sulteng, namun tampaknya lahan yang potensial tersebut telah dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan baik pertanian maupun nonpertanian. Untuk daerah Sulawesi yang masih memungkinkan pengembangan sawah adalah di daerah Sulawesi Tenggara (Sultra), Sulawesi Utara (Sulut) dan Gorontalo dalam luasan yang tidak begitu besar.

Sebaran lahan sawah

Lahan sawah di Indonesia berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2002 luasnya sekitar 7,75 juta ha (tidak termasuk Papua dan Maluku), sebagian besar terdapat di Jawa 3,32 juta ha (42,8% dari luas sawah Indonesia), kemudian Sumatera 2,10 juta ha (27,2% dari luas sawah Indonesia), Kalimantan 1,01 juta ha (13,0% dari luas sawah Indonesia) dan Sulawesi 0,90 juta ha (11,6% dari luas sawah Indonesia). Sedangkan di Nusa Tenggara dan Bali hanya 0,42 juta ha atau 5,4% dari luas sawah Indonesia (Tabel 5).

Berdasarkan status pengairannya, ternyata lahan sawah irigasi (teknis dan semiteknis) mencakup areal terluas, yakni sekitar 3,2 juta ha, yang tersebar terutama di Pulau Jawa, Sumatera, Sulawesi dan Nusa Tenggara-Bali. Lahan sawah tadah hujan hanya mencakup 2,02 juta ha, namun lebih luas daripada lahan sawah irigasi sederhana yang luasnya sekitar 1,59 juta ha, terdapat di Jawa, Sumatera, Kalimantan dan Sulawesi. Lahan sawah pasang surut mencapai luas 0,62 juta ha, dan lahan sawah lainnya yakni sawah lebak 0,33 juta ha, penyebarannya terutama di Sumatera dan Kalimantan.

Jawa

Pulau Jawa sebagai penghasil beras utama di Indonesia memiliki lahan sawah terluas yakni 3,32 juta ha atau 42,8% dari luas total lahan sawah Indonesia. Penyebarannya terutama terdapat di daerah pantai utara (Pantura) dan daerah lereng bawah atau kaki gunung vulkan di bagian tengah yang membentang dari barat di Provinsi Banten sampai ke timur di Provinsi Jatim. Lahan sawah terluas di daerah ini berturut-turut di Provinsi Jatim (1,15 juta ha), kemudian Provinsi Jateng (0,99 juta ha), dan Jawa Barat (0,91 juta ha). Tiga Provinsi lainnya yakni Banten, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) dan DKI Jakarta sangat sempit masing-masing 0,21, 0,06, dan 0,003 juta ha.

Berdasarkan status pengairannya, lahan sawah di Jawa didominasi oleh sawah irigasi teknis dan semiteknis yakni sekitar 1,28 juta ha (57,9% dari luas lahan sawah Jawa), berikutnya adalah sawah tadah hujan 0,78 juta ha dan sawah irigasi sederhana 0,62 juta ha. Lahan sawah pasang surut dan lebak di Jawa sangat

sempit. Lahan sawah irigasi teknis dan semi teknis sebagian besar terdapat di Jatim (0,78 juta ha), kemudian Jateng dan Jabar masing-masing 0,51 dan 0,50 juta ha. Provinsi lainnya sangat sempit, yakni di Banten hanya 0,08 juta ha, DIY 0,06 juta ha dan DKI Jakarta 0,003 juta ha.

Tabel 5. Luas sawah menurut jenis pengairan, tahun 2002

Pulau/ provinsi	Irigasi teknis	Irigasi semiteknis	Irigasi sederhana	Tadah hujan	Pasang surut	Lainnya	Total
	ha						
NAD	57.996	55.899	83.331	89.540	525	1.283	288.574
Sumut	70.360	76.222	120.083	149.547	25.927	29.110	471.249
Sumbar	37.149	59.130	94.917	53.130		80	244.406
Riau		7.978	28.663	43.461	28.521	3.312	111.935
Jambi	3.772	9.087	25.426	16.242	53.090	20.452	128.069
Sumsel	27.734	10.350	40.729	84.420	147.040	148.967	459.240
Bengkulu	21.779	18.144	18.297	19.174	1.556	9.412	88.362
BaBel	270	450	985	110			1.815
Lampung	102.174	20.511	42.804	95.316	32.002	18.005	310.812
<i>Sumatera</i>	<i>321.234</i>	<i>257.771</i>	<i>455.235</i>	<i>550.940</i>	<i>288.661</i>	<i>230.621</i>	<i>2.104.462</i>
Kalbar		9.573	82.635	108.212	94.481	4.480	299.381
Kalteng	5.403	14.111	53.007	40.353	54.163	1.680	168.717
Kalsel	19.455	4.590	29.887	118.373	157.118	90.954	420.377
Kaltim	80	5.023	23.797	72.767	17.794	489	119.950
<i>Kalimantan</i>	<i>24.938</i>	<i>33.297</i>	<i>189.326</i>	<i>339.705</i>	<i>323.556</i>	<i>97.603</i>	<i>1.008.425</i>
Sulut	19.589	16.559	14.588	13.035	50	50	63.871
Sulteng	43.396	29.894	36.481	10.095	681	413	120.960
Sulsel	168.782	54.803	156.393	247.191	1.250	100	628.519
Sultra	22.259	14.711	22.816	4.755	198	321	65.060
Gorontalo	8.118	5.435	4.655	4.219			22.427
<i>Sulawesi</i>	<i>262.144</i>	<i>121.402</i>	<i>234.933</i>	<i>279.295</i>	<i>2.179</i>	<i>884</i>	<i>900.837</i>
NTB	66.826	80.686	37.126	33.839	19	0	218.496
NTT	14.541	26.278	42.581	36.033	0	998	120.431
Bali	2.882	64.871	13.678	801	0	6	82.238
<i>NT+Bali</i>	<i>84.249</i>	<i>171.835</i>	<i>93.385</i>	<i>70.673</i>	<i>19</i>	<i>1.004</i>	<i>421.165</i>
<i>Luar Jawa</i>	<i>692.565</i>	<i>584.305</i>	<i>972.879</i>	<i>1.240.613</i>	<i>614.415</i>	<i>330.112</i>	<i>4.434.889</i>
<i>% Luar Jawa</i>	<i>8,9</i>	<i>7,5</i>	<i>12,6</i>	<i>16,0</i>	<i>7,9</i>	<i>4,3</i>	<i>57,2</i>
Banten	61.863	16.004	42.602	88.672	0	145	209.286
Jawa Barat	373.965	125.278	250.855	161.859	15	1.383	913.355
DKI Jakarta	860	656	950	355	0	0	2.821
Jawa Tengah	390.147	124.532	195.072	273.973	313	1.773	985.810
DI Yogyakarta	18.490	23.481	6.674	9.608	0	0	58.253
Jawa Timur	670.927	112.796	119.019	242.562	448	163	1.145.915
<i>Jawa</i>	<i>1.516.252</i>	<i>402.747</i>	<i>615.172</i>	<i>777.029</i>	<i>776</i>	<i>3.464</i>	<i>3.315.440</i>
<i>% Jawa</i>	<i>19,6</i>	<i>5,2</i>	<i>7,9</i>	<i>10,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>42,8</i>
Total Indonesia	2.208.817	987.052	1.588.051	2.017.642	615.191	333.576	7.750.329

Sumber : Badan Pusat Statistik (2002)

Lahan sawah terluas kedua di Jawa adalah sawah tadah hujan (0,78 juta ha atau 23,4% dari luas lahan sawah Jawa), sebagian besar terdapat di Jateng 0,27 juta ha, berikutnya Jatim (0,24 juta ha), Jabar 0,16 juta ha, dan Banten 0,09

juta ha. Penyebaran lahan sawah tadah hujan umumnya di bagian tengah Jawa pada daerah-daerah berlereng berupa sawah berteras yang tidak terjangkau oleh pengairan dari waduk-waduk besar maupun kecil yang terdapat di pulau ini.

Lahan sawah yang juga cukup luas di Jawa adalah sawah irigasi sederhana yang mencapai luas 0,62 juta ha atau 18,6% dari luas sawah Jawa. Penyebarannya yang cukup luas terutama pada Provinsi Jabar, Jateng dan Jatim, sedangkan di provinsi lainnya tidak begitu luas sesuai dengan luas wilayahnya.

Sumatera

Lahan sawah di Sumatera sekitar 2,10 juta ha atau 27,2% dari luas lahan sawah Indonesia, terdapat di seluruh provinsi. Sawah terluas terdapat di Sumut 0,47 juta ha dan tersempit di Bangka Belitung yakni hanya sekitar 1.815 ha. Selain di Sumut, juga lahan sawah cukup luas terdapat di Sumsel 0,46 juta ha, Lampung 0,31 juta ha, Nangroe Aceh Darussalam (NAD) 0,29 juta ha dan Sumbar 0,24 juta ha. Provinsi Jambi, Riau dan Bengkulu masing-masing mempunyai lahan sawah sekitar 0,13 juta ha, 0,11 juta ha dan 0,09 juta ha.

Berdasarkan status pengairannya, lahan sawah terluas di Sumatera adalah sawah irigasi teknis dan semiteknis sekitar 0,58 juta ha, berikutnya adalah sawah tadah hujan 0,55 juta ha, sawah irigasi sederhana 0,46 juta ha, sawah pasang surut 0,29 juta ha dan tersempit sawah lainnya (lebak) sekitar 0,23 juta ha. Lahan sawah irigasi teknis dan semiteknis sebagian besar terdapat di wilayah Provinsi Sumut yaitu 0,15 juta ha, berikutnya di Provinsi Lampung 0,12 juta ha, NAD 0,11 juta ha Sumbar 0,10 juta ha, dan Bengkulu 0,04 juta ha. Provinsi Sumsel yang luas total lahan sawahnya cukup luas, ternyata hanya memiliki 0,04 juta ha lahan sawah irigasi teknis dan semiteknis. Provinsi Jambi, Riau dan Bangka Belitung memiliki lahan sawah irigasi sangat sempit, yakni <0,02 juta ha.

Lahan sawah tadah hujan yang luasnya hampir sama dengan lahan sawah irigasi, sebagian besar terdapat di Provinsi Sumut yakni 0,15 juta ha, kemudian Lampung 0,10 juta ha, NAD 0,09 juta ha, Sumsel 0,08 juta ha dan Sumbar 0,05 juta ha. Provinsi Riau, Jambi, Bengkulu dan Bangka Belitung <0,05 juta ha.

Lahan sawah irigasi sederhana yang juga cukup luas di Sumatera (0,46 juta ha), sebagian besar terdapat di Provinsi Sumut (0,12 juta ha), berikutnya adalah NAD dan Sumbar masing-masing 0,08 dan 0,09 juta ha. Sedangkan Provinsi lainnya mempunyai lahan sawah irigasi sederhana yang umumnya <0,05 juta ha.

Selain dari lahan sawah irigasi dan tadah hujan di Sumatera juga terdapat lahan sawah pasang surut dan lebak yang cukup luas. Penyebarannya terutama terdapat di pantai timur Pulau Sumatera yang berupa dataran rendah atau daerah pasang surut dan rawa lebak. Lahan tersebut sebagian besar terdapat di Sumsel, kemudian Jambi, Sumut, dan Riau.

Kalimantan

Lahan sawah di Kalimantan luasnya mencapai satu juta hektar, yang terluas terdapat di Provinsi Kalsel 0,42 juta ha, kemudian Kalbar 0,30 juta ha, Kalteng 0,17 juta ha, dan tersempit di Kaltim yakni 0,12 juta ha. Penyebarannya sesuai dengan keadaan topografinya, yakni pada daerah-daerah dataran aluvial dan dataran pasang surut.

Berdasarkan status pengairannya ternyata lahan sawah dominan di Kalimantan adalah sawah tadah hujan dan sawah pasang surut, yakni masing-masing 0,34 juta ha dan 0,32 juta ha. Lahan sawah irigasi sederhana mencapai luas 0,19 juta ha, sedangkan sawah irigasi teknis dan semiteknis hanya 0,06 juta ha. Sawah tadah hujan terluas terdapat di wilayah Provinsi Kalsel dan Kalbar. Demikian pula lahan sawah pasang surut terdapat cukup dominan di Kalsel, Kalteng, dan Kalbar. Sedangkan di Provinsi Kaltim didominasi oleh sawah tadah hujan.

Sulawesi

Sulawesi sebagai penghasil beras utama di Kawasan Timur Indonesia memiliki lahan sawah cukup luas, yakni sekitar 0,90 juta ha. Namun penyebaran lahan sawah tersebut tidak merata di seluruh provinsi, karena sebagian besar terdapat di Provinsi Sulsel yakni sekitar 0,63 juta ha atau 69,8% dari luas lahan sawah Sulawesi. Provinsi lainnya relatif sempit, yakni <0,07 juta ha, kecuali di Provinsi Sulteng 0,12 juta ha.

Lahan sawah irigasi teknis dan semiteknis mendominasi daerah ini dengan luas 0,38 juta ha atau 42,6% dari luas lahan sawah Sulawesi, disusul sawah tadah hujan 0,28 juta ha (31,0% dari luas lahan sawah Sulawesi) dan sawah irigasi sederhana 0,23 juta ha (26,1%). Lahan sawah pasang surut dan lainnya (lebak) sangat sempit di daerah ini, yakni terdapat di Sulteng, Sulsel, dan Sultra. Penyebaran lahan sawah irigasi terluas terdapat di wilayah Provinsi Sulsel, yakni di bagian tengah dari provinsi ini diantaranya di wilayah Kabupaten Sidrap, Pinrang, Watampone, Wajo dan Soppeng. Demikian pula dengan lahan sawah tadah hujan dan sawah irigasi sederhana penyebaran terluas terdapat di provinsi Sulsel. Provinsi lainnya relatif sangat sempit, karena keadaan topografinya yang sebagian besar berbukit sampai bergunung.

Nusa Tenggara dan Bali

Lahan sawah di kedua wilayah ini tergolong tidak begitu luas sesuai dengan luas wilayah dan potensinya, yakni sekitar 0,42 juta ha (5,6% dari luas lahan sawah Indonesia). Penyebaran terluas terdapat di wilayah Provinsi NTB (0,22 juta ha), kemudian disusul NTT 0,12 juta ha dan Bali 0,08 juta ha.

Walaupun daerah ini mempunyai kondisi iklim yang kering, ternyata lahan sawah irigasi masih mendominasi, yakni mencapai 0,26 juta ha (60,8% dari luas sawah Nusa Tenggara dan Bali), sedangkan lahan sawah irigasi sederhana dan tadah hujan masing-masing 0,09 juta ha⁻¹ dan 0,07 juta ha⁻¹. Penyebaran lahan sawah pasang surut maupun lebak sangat sempit. Penyebaran lahan sawah irigasi terluas terdapat di NTB (Pulau Lombok) dan Bali, sedangkan lahan sawah irigasi sederhana dan tadah hujan terutama di wilayah NTT.

Ketersediaan dan potensi sumber daya air

Kecenderungan meningkatnya permintaan pangan utama, pertumbuhan sektor-sektor industri, perumahan, dan lingkungan akan mendorong peningkatan kebutuhan sumber daya air. Secara nasional ketersediaan sumber daya air nasional masih sangat besar. Namun hal ini tidak sepenuhnya benar mengingat tidak seluruh sumber daya air tersebut dapat dimanfaatkan (*utilizable*). Bila dilihat dari *potentially utilizable water resource* (PUWR), yaitu sumber daya air yang berpotensi bisa dimanfaatkan, mungkin Indonesia telah mengalami status kelangkaan air (Pasandaran, 1999).

Ketersediaan sumber daya air nasional (*annual water resources*, AWR) masih sangat besar, terutama di wilayah barat, akan tetapi tidak semuanya dapat dimanfaatkan. Sebaliknya di sebagian besar wilayah timur bagian selatan yang radiasinya melimpah, curah hujan rendah (<1.500 mm tahun⁻¹) yang hanya terdistribusi selama 3-4 bulan.

Tabel 6. Total air tersedia menurut wilayah/kepulauan di Indonesia

Wilayah/ pulau	Luas km ²	Curah hujan mm th ⁻¹	Total air tersedia			Kebutuhan air irigasi MCM
			mm th ⁻¹	m ³ det ⁻¹	MCM	
Sumatera	477.379	2.801	2.128	32.198	1.015.396	19.417
Jawa	121.304	2.555	1.915	7.360	232.105	32.255
Bali dan NT	87.939	1.695	1.167	3.251	102.525	3.808
Kalimantan	534.847	2.956	2.264	38.369	1.210.004	8.123
Sulawesi	190.375	2.156	1.568	9.458	298.267	7.855
Maluku/Papua	499.300	30.221	2.221	37.139	1.171.215	218
Indonesia	1.911.144	2.779	2.110	127.775	4.029.512	71.676

Keterangan: MCM= juta meter kubik

Tabel 6 menunjukkan bahwa total pasokan atau ketersediaan air wilayah (air permukaan dan air tanah) di seluruh Indonesia adalah 2.110 mm tahun⁻¹ setara dengan 127.775 m³ detik⁻¹ (Pawitan *et al.*, 1996; Las *et al.*, 1998). Berdasarkan analisis "*water-demand-supply 2020*" oleh *International Water Management Institute* (IWMI), Indonesia dikategorikan sebagai negara kelompok

3 berdasarkan kebutuhan dan potensi sumber daya airnya yang membutuhkan pengembangan sumber daya 25-100% dibanding saat ini. Secara nasional negara tersebut memiliki potensi sumber daya air yang cukup untuk itu, namun secara regional/pulau masih perlu dianalisis lebih lanjut dengan memperhatikan berbagai parameter dan faktor yang berpengaruh secara rinci dan akurat.

Penggunaan air untuk kebutuhan domestik dan di daerah perkotaan dan pedesaan adalah sekitar 1,26 milyar m³ atau dua persen dari air tersedia atau dua persen dari kebutuhan air pertanian. Dua pertiga dari kebutuhan ini dipenuhi dari sungai dan sepertiga sisanya dari mata air (Pawitan *et al.*, 1996). Untuk industri pemenuhan kebutuhan airnya umumnya mengandalkan air tanah. Di Jawa Barat 65% kebutuhan air industri dipenuhi oleh air tanah, 25% dari sungai dan danau, dan hanya 10% dari pasok air kota. Untuk kota-kota utama, proyeksi kebutuhan air industri diperkirakan akan mencapai 50% dari pasok air kota, sedang untuk kota-kota kecil hanya 25%. Pasok air pedesaan diperkirakan 60% dipenuhi dari air tanah dangkal. Sumber lainnya adalah sungai, mata air, tampungan hujan, dan pompa tangan (Pawitan *et al.*, 1996).

Kebutuhan air pertanian pada umumnya diperhitungkan dari kebutuhan dasar irigasi sebesar 1,0 lt dt⁻¹ ha⁻¹ (Pawitan *et al.*, 1996). Tetapi Departemen Pertanian (Bappenas, 1991) dengan menggunakan hasil penelitian *food agricultural organization* (FAO) yaitu kebutuhan air optimal tanaman adalah 450-700 mm bagi tanaman berumur 90-150 hari, atau setara dengan pemberian air irigasi sebesar 5.750 m³ ha⁻¹ bagi varietas berumur 150 hari, atau setara 0,54 lt dt⁻¹ ha⁻¹. Kebutuhan air irigasi merupakan porsi terbesar dari total kebutuhan air. Sekitar 50% dari kebutuhan padi sawah dipenuhi dari air irigasi dan sisanya dari hujan. Rerata penggunaan air irigasi adalah 8.000-12.000 m³ MT ha⁻¹, tergantung besar hujan (Pawitan, 1996).

Dewasa ini, masalah meningkatnya tekanan terhadap sumber daya air di beberapa tempat semakin besar, yang disebabkan oleh peningkatan jumlah penduduk dan permintaan akibat pertumbuhan ekonomi dan proses urbanisasi (Pasandaran, 1996). Penyebab berikutnya adalah kelangkaan air akibat tekanan demografi, anomali iklim (*El Nino dan La Nina*) serta rendahnya komitmen pemerintah dan masyarakat dalam mengelola air yang tercemar, sehingga ketersediaan air yang berkualitas cenderung menurun. Penurunan tersebut mempengaruhi pemenuhan air untuk kebutuhan rumah tangga, pertanian, industri, dan lingkungan.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan oleh Sub Direktorat Hidrologi Depkimpraswil, permintaan air pada tahun 2002 untuk keperluan irigasi, industri, perkotaan, dan rumah tangga masih dapat dipenuhi karena ketersediaan air jauh lebih besar dari permintaannya (Tabel 7). Permintaan air seluruhnya hanya sebesar 3% dari total ketersediaan air, dan hampir 80% permintaan tersebut

adalah untuk keperluan irigasi. Berdasarkan analisis permintaan dan ketersediaan air berbasis pulau, rasio terbesar antara permintaan dengan ketersediaan air adalah untuk Pulau Jawa yang mencapai nilai sebesar 25%, (87% dari nilai tersebut diantaranya untuk keperluan irigasi), sedangkan rasio terkecil untuk Pulau Maluku dan Papua yang hanya mencapai nilai 0,1% (sebagian besar permintaan air adalah untuk keperluan rumah tangga).

Rasio permintaan air yang terbesar di tingkat provinsi adalah untuk DKI Jakarta yang mencapai nilai 43% (56% dari nilai tersebut di antaranya untuk keperluan irigasi), sedangkan rasio terkecil untuk Provinsi Papua yang hanya mencapai 0,08%.

Berdasarkan analisis ketersediaan air untuk tahun 2005, 2010, dan 2020, dapat diprediksi bahwa kebutuhan air sampai tahun 2020 masih dapat dipenuhi dari air yang tersedia saat ini (Tabel 8). Proyeksi permintaan air untuk tahun 2020 hanya sebesar 18% dari total air tersedia, digunakan sebagian besar untuk keperluan irigasi (66%), sisanya 17% untuk rumah tangga, 7% untuk perkotaan dan 9% untuk industri.

Berdasarkan analisis yang sama untuk satuan pulau, pada tahun 2020, Bali dan Nusa Tenggara akan membutuhkan 75% dari air yang tersedia saat ini di wilayahnya, disusul Pulau Jawa sebesar 72%, Sulawesi 42%, Sumatera 34%, sedangkan Kalimantan dan Maluku-Papua masing-masing hanya akan membutuhkan 2,3% dan 1,8% dari total air tersedia saat ini. Jika berdasarkan analisis tingkat provinsi, maka Bali pada tahun 2005 akan mengalami defisit air sebesar 10% dari air tersedia saat ini, akibat kebutuhan air irigasi yang akan meningkat dua kali lipat dari kebutuhan saat ini. Pada tahun 2020, diprediksi bahwa kekurangan air akan mencapai 20% dari total air tersedia saat ini.

DKI Jakarta dan NTB, diprediksi akan mulai mengalami kekurangan air pada tahun 2010. DKI Jakarta akan mengalami kekurangan air sebesar 25% dari total air yang tersedia di wilayahnya, akibat meningkatnya permintaan air untuk rumah tangga, perkotaan dan industri sebesar empat kali lipat dibandingkan dengan kebutuhan saat ini, serta meningkatnya kebutuhan air untuk irigasi sebesar dua kali lipat. Pada tahun 2020 kekurangan air akan meningkat menjadi 108% dari total air tersedia. Sementara di Provinsi NTB, kekurangan air pada tahun 2010 diprediksi akan mencapai 68% dari total air tersedia dan sedikit meningkat menjadi 72% pada tahun 2020. Kekurangan air ini diakibatkan meningkatnya kebutuhan air irigasi yang akan mencapai empat kali lipat dibandingkan kebutuhan saat ini.

Tabel 7. Ketersediaan air dan permintaan aktual untuk keperluan irigasi dan lainnya (rumah tangga, perkotaan, dan industri)

Provinsi/pulau	Ketersediaan rata-rata	Permintaan pada tahun 2002		
		Irigasi	Lainnya (R.tangga, perkotaan, industri)	Total
	m ³ det ⁻¹			
Nangroe	Aceh			
Darussalam	3.042	127	13	140
Sumatera Utara	2.949	167	134	301
Sumatera Barat	1.671	-	104	104
Riau	5.021	74	22	97
Jambi	2.681	31	9	40
Sumsel dan Babel	4.794	63	38	101
Bengkulu	1.662	42	4	46
Lampung	1.528	95	25	120
SUMATERA	23.347	598	351	949
DKI Jakarta	317	76	59	135
Banten	252	29	3	32
Jawa Barat	2.171	372	53	425
Jawa Tengah	1.665	337	26	363
D.I. Yogyakarta	175	50	6	56
Jawa Timur	1.355	419	48	467
JAWA	5.936	1.283	194	1.478
JAWA dan BALI	6.109	1.374	197	1.572
Kalbar	10.154	5	5	10
Kalsel	5.668	7	8	15
Kalteng	5.824	0	13	13
Kaltim	10.318	3	20	24
KALIMANTAN	31.965	16	46	62
Bali	173	91	3	94
NTB	405	165	3	167
NTT	908	24	2	26
BALI	dan			
N.TENGGARA	1.486	279	8	287
NUSA TENGGARA	1.313	188	5	193
Sulawesi Utara	1.004	43	3	46
Gorontalo	222	11	1	12
Sulteng	3.683	72	13	85
Sultra	218	6	1	7
Sulsel	2.699	232	14	246
SULAWESI	7.825	364	32	396
Maluku Utara	1.324	1	0	1
Maluku	1.994	10	8	18
Papua	27.786	2	19	21
MALUKU dan PAPUA	31.104	13	28	41
INDONESIA	101.664	2.554	659	3.213

Sumber: Sub Direktorat Hidrologi, Direktorat Pemanfaatan Sumber daya Air, Dep. Kimpraswil (2003).

Tabel 8. Proyeksi kebutuhan air periode 2005-2020

Provinsi/pulau	Ketersediaan rata-rata	Proyeksi permintaan tahun 2005			Proyeksi permintaan tahun 2010			Proyeksi permintaan tahun 2020		
		Irigasi	Lainnya (R.tangga, perkotaan, industri)	Total	Irigasi	Lainnya (R.tangga, perkotaan, industri)	Total	Irigasi	Lainnya (R.tangga, perkotaan, industri)	Total
	m ³ detik ⁻¹									
Nangroe Aceh Darussalam	3.042	257	27	284	514	55	569	1.028	116	1.143
Sumatera Utara	2.949	338	272	610	676	556	1.232	1.352	1.162	2.515
Sumatera Barat	1.671		211	211		430	430		864	864
Riau	5.021	151	46	197	302	93	395	604	196	800
Jambi	2.681	63	18	81	126	36	163	253	77	329
Sumsel	4.794	127	78	205	254	160	414	509	334	843
Bengkulu	1.662	85	9	94	170	18	188	341	37	378
Lampung	1.528	192	51	244	384	105	490	769	221	990
SUMATERA	23.347	1.214	711	1.925	2.428	1.454	3.881	4.856	3.007	7.863
DKI Jakarta	317	154	120	274	154	243	397	154	507	661
Banten	252	59	6	65	59	13	72	59	27	86
Jawa Barat	2.171	755	107	862	755	218	973	755	454	1.209
Jawa Tengah	1.665	685	52	737	685	106	790	685	220	905
DI Yogyakarta	175	102	11	113	102	23	124	102	48	149
Jawa Timur	1.355	851	96	947	851	195	1.046	851	406	1.257
JAWA	5.936	2.606	392	2.998	2.606	797	3.403	2.606	1.661	4.267
JAWA DAN BALI	6.109	2.790	398	3.188	2.790	809	3.599	2.790	1.684	4.475
Kalbar	10.154	11	35	46	21	72	93	42	145	187
Kalsel	5.668	15	31	46	29	64	93	58	131	190
Kalteng	5.824	1	36	37	2	73	75	3	151	154
Kaltim	10.318	7	41	48	13	85	98	26	178	204
KALIMANTAN	31.965	32	144	176	65	294	358	130	606	735

Tabel lanjutan

Provinsi/pulau	Ketersediaan rata-rata	Proyeksi permintaan tahun 2005			Proyeksi permintaan tahun 2010			Proyeksi permintaan tahun 2020		
		Irigasi	Lainnya (R.tangga, perkotaan, industri)	Total	Irigasi	Lainnya (R.tangga, perkotaan, industri)	Total	Irigasi	Lainnya (R.tangga, perkotaan, industri)	Total
	m ³ detik ⁻¹									
Bali	173	185	5	190	185	11	196	185	23	208
NTB	405	334	5	340	669	11	680	669	23	692
NTT	908	48	4	52	96	9	105	192	19	211
BALI DAN NT	1.486	567	15	582	949	31	981	1.046	66	1.111
NUSATENGARA	1.313	382	10	392	765	20	785	861	42	903
Sulawesi Utara	1.004	87	26	113	173	53	227	347	108	454
Gorontalo	222	23	2	25	46	5	50	91	10	101
Sulteng	3.683	146	26	172	292	53	345	584	110	695
Sultra	218	12	2	14	25	4	29	49	9	58
Sulsel	2.699	471	28	499	942	58	1.000	1.884	121	2.005
SULAWESI	7.825	739	84	823	1.478	173	1.650	2.956	357	3.313
Maluku Utara	1.324	2	1	2	3	2	5	7	3	10
Maluku	1.994	20	17	37	41	34	75	81	71	153
Papua	27.786	5	89	93	9	181	190	19	369	388
MALUKU dan PAPUA	31.104	27	106	133	53	216	270	107	444	551
INDONESIA	101.664	5.185	1.452	6.637	7.579	2.965	10.544	11.700	6.140	17.840

Pengembangan lahan sawah di masa depan

Untuk melihat berapa luas lahan yang potensial untuk pengembangan sawah di masa depan, akan dibandingkan antara data luas lahan yang sesuai dengan data luas lahan sawah yang ada saat ini. Kondisi data luas lahan sawah secara spasial sulit diperoleh untuk keseluruhan wilayah Indonesia, sehingga untuk penghitungan data potensi lahan tersebut digunakan data tabular tahun 2001 (BPS, 2002). Oleh karena itu, membandingkan data spasial dengan data tabular ini bukanlah cara yang paling akurat, namun demikian tetap dapat digunakan untuk memberikan gambaran secara umum. Untuk wilayah Maluku dan Papua, tidak hanya data luas lahan sawah saja yang tidak tersedia, tetapi keseluruhan data penggunaan lahan juga tidak tersedia.

Tabel 4 menunjukkan luas lahan yang sesuai untuk sawah seluas 24,56 juta ha, sedangkan luas sawah yang ada pada tahun 2002 seluas 7,75 juta ha⁻¹, sehingga lahan yang potensial untuk pengembangan sawah mencapai luas 16,82 juta ha⁻¹. Pengembangan sawah sebagian besar terdapat di luar Jawa, yaitu di Papua, Sumatera, dan Kalimantan, masing-masing dengan lahan berpotensi 7,4; 3,95; dan 2,01 juta ha.

Secara rinci, lahan yang potensial untuk pengembangan sawah di Sumatera, sebagian besar di Sumatera Selatan dan Riau, masing-masing 0,96 juta ha dan 0,67 juta ha. Di Kalimantan sebagian besar terdapat di Provinsi Kalteng 0,93 juta ha dan Kalsel 0,48 juta ha. Sedangkan di Sulawesi sebagian besar terdapat di Provinsi Sulsel 0,55 juta ha dan Sulteng 0,49 juta ha. Wilayah terluas untuk pengembangan di masa depan adalah di Papua yaitu 7,41 juta ha, namun perlu tetap dipertimbangkan dan dialokasikan untuk tanaman sagu yang merupakan tanaman spesifik dan bahkan makanan pokok masyarakat di wilayah ini.

Luas lahan yang potensial untuk pengembangan lahan sawah di beberapa wilayah di Indonesia seperti dikemukakan sebelumnya tampaknya masih cukup luas, namun perlu dipahami bahwa luas tersebut didasarkan pada data atau peta eksplorasi yang masih bersifat kasar yang tersedia untuk seluruh wilayah Indonesia. Data yang lebih detail yang dapat memberikan nilai lebih akurat masih sangat terbatas pada beberapa wilayah.

Sebagai contoh dari hasil penelitian pada skala peta yang lebih detail yang dilakukan melalui penyusunan peta pewilayahan komoditas dan ketersediaan lahan skala 1:250.000 di Provinsi Sumbar, Riau, dan Jambi pada tahun 2002 (Puslitbangtanak, 2002), menunjukkan bahwa lahan potensial dan tersedia untuk pengembangan lahan sawah di daerah tersebut masing-masing adalah 110 ribu ha di Sumbar, 523 ribu ha di Riau, dan 282 ribu ha di Jambi. Luasan tersebut lebih rendah sekitar 39% jika dibandingkan dengan hasil perhitungan potensi pengembangan lahan sawah berdasarkan data/peta tanah berskala 1:1.000.000

(eksplorasi) di ketiga provinsi tersebut yakni seluas 1.496 ribu ha (Tabel 4). Demikian pula dengan penelitian yang lebih detail untuk menentukan potensi lahan sawah telah dilakukan pada tahun 1994 melalui kerjasama dengan Direktorat Bina Rehabilitasi dan Pengembangan Lahan, Deptan. Hasil penelitian melalui pemetaan tanah detail dan semi detail di 13 lokasi PIADP (*provincial irrigated agriculture development project*) di Sumatera, Kalimantan dan Sulawesi (Riau, Bengkulu, Sumsel, Lampung, Kalbar, Kalteng, Kalsel dan Sulteng) pada lahan seluas 17.128 ha, menunjukkan bahwa lahan yang sesuai untuk sawah irigasi 10.966 ha (64,0%) dan sawah rawa 2.171 ha (12,7%) (Suharta dan Soekardi, 1994a; 1994b). Oleh karena itu penelitian yang lebih detail perlu dilakukan untuk memperoleh data dan informasi yang lebih akurat.

Berdasarkan Atlas Pewilayahan Komoditas Pertanian Unggulan Nasional (Puslitbangtanak, 2002), luas lahan yang sesuai untuk sawah dikelompokkan menjadi lima jenis pola tanam yaitu (1) padi sawah; (2) padi sawah – palawija/hortikultura semusim dataran rendah beriklim basah; (3) padi sawah – palawija/hortikultura semusim dataran tinggi beriklim basah; (4) padi sawah – palawija/hortikultura semusim dataran rendah beriklim kering; dan (5) padi sawah – palawija/hortikultura semusim dataran tinggi beriklim kering. Hasil pengelompokan tersebut, ternyata untuk pola padi sawah 1,7 juta ha, terdapat di Sumatera dan Kalimantan (Tabel 9). Untuk pola padi sawah – palawija/hortikultura semusim yang terletak pada dataran rendah dan mempunyai iklim basah 17,5 juta ha, terluas di Papua, Jawa, dan Sumatera, sedangkan untuk dataran tingginya sangat kecil yaitu 0,98 juta ha. Untuk pola yang sama tetapi pada dataran rendah beriklim kering 4,0 juta ha, terluas di Papua dan Maluku, dan untuk dataran tingginya sangat kecil yaitu 0,073 juta ha.

Tabel 9. Luas lahan sesuai untuk padi sawah-palawija/hortikultura per pulau di Indonesia (x 1.000 ha)

Arahahan pengembangan	Sumatera	Jawa	Bali dan NT	Kalimantan	Sulawesi	Papua dan Maluku	Indonesia
Padi sawah	1.377	0	0	362	0	0	1.739
Padi sawah-palawija/hortikultura dataran rendah, iklim basah	3.075	3.175	122	2.565	1.682	6.935	17.554
Padi sawah-palawija/hortikultura dataran tinggi, iklim basah	252	424	12	0	82	211	981
Padi sawah-palawija/hortikultura dataran rendah, iklim kering	177	968	316	0	431	2.150	4.043
Padi sawah-palawija/hortikultura dataran tinggi, iklim kering	25	6	32	0	10	0	73
Total	4.906	4.573	482	2.927	2.205	9.295	24.389

Sumber: Atlas Pewilayahan Komoditas Pertanian Nasional skala 1.000.000 (Puslitbangtanak, 2002)

Pada tahun 1991/1992, Puslitbangtanak telah mengevaluasi kesesuaian lahan untuk padi sawah di beberapa provinsi pada skala tinjau (skala 1:250.000), yaitu NAD, Sumbar, Riau, Jambi, Bengkulu, Sumsel, Sulsel, Sulteng, dan Papua. Hasil evaluasi dikelompokkan menjadi lahan sesuai untuk intensifikasi (I) dan lahan sesuai untuk ekstensifikasi (E). Lahan sesuai intensifikasi adalah lahan yang sesuai dan pada saat itu sudah berupa sawah, baik itu sawah irigasi, tadah hujan, lebak ataupun pasang surut, namun perlu peningkatan produktivitas. Sedangkan lahan sesuai ekstensifikasi adalah lahan yang sesuai untuk pengembangan (pencetakan) lahan sawah dan saat itu belum dimanfaatkan untuk lahan sawah ataupun pertanian lainnya, masih berupa semak belukar ataupun rumput. Evaluasi lahan tersebut dilaksanakan pada tahun 1991/1992 dengan menggunakan data penggunaan lahan tahun 1989, sehingga lahan-lahan yang dahulu masih berupa semak belukar atau rumput dan sesuai untuk pengembangan sawah, selama 15 tahun terakhir ini kemungkinan besar sudah mengalami perubahan. Misalnya lahan-lahan rawa (gambut dan pasang surut) di Riau, Jambi, dan Sumsel yang saat ini telah dibuka untuk perkebunan kelapa sawit atau HTI. Sebagai contoh dari hasil penelitian penyusunan peta pewilayahan komoditas dan ketersediaan lahan skala 1:250.000 di provinsi Sumbar, Riau dan Jambi pada tahun 2002 (Puslitbangtanak, 2002), menunjukkan bahwa lahan potensial dan tersedia untuk pengembangan lahan sawah di daerah tersebut masing-masing adalah 110 ribu ha⁻¹ di Sumbar, 523 ribu ha⁻¹ di Riau, dan 282 ribu ha di Jambi. Luasan tersebut lebih rendah dari hasil evaluasi pada tahun 1991/1992. Penyebaran lahan-lahan yang potensial untuk pengembangan sawah di sembilan provinsi hasil evaluasi tahun 1991/1992 tersebut dapat dilihat pada peta kesesuaian lahan untuk sawah yang telah tersedia.

Berdasarkan evaluasi pada tahun 1991/1992 di sembilan provinsi tersebut, lahan yang sesuai untuk intensifikasi seluas 3,32 juta ha, terluas terdapat di Sumsel dan Riau (Tabel 10). Lahan sesuai intensifikasi ini adalah lahan yang saat ini sudah berupa lahan sawah, yang masih bisa diintensifkan dan ditingkatkan produksinya yaitu melalui pengelolaan lahan, penggunaan varietas unggul dan pemupukan berimbang. Sedangkan untuk ekstensifikasi atau perluasan areal sawah mencapai luas 12,97 juta ha, terdiri atas lahan-lahan yang berpotensi tinggi (P1) dan berpotensi sedang (P2). Lahan-lahan berpotensi untuk ekstensifikasi tersebut, baik untuk sawah irigasi, sawah pasang surut, sawah lebak, maupun sawah tadah hujan terluas terdapat di Papua, Sumsel, Jambi, dan Riau. Penyebarannya di masing-masing provinsi dapat dilihat langsung dalam peta kesesuaian lahannya.

Tabel 10. Luas lahan yang sesuai untuk intensifikasi dan ekstensifikasi di sembilan

provinsi

Provinsi	Intensifikasi				Ekstensifikasi		
	I1	I2	I3	Total	P1	P2	Total
	----- x 1000 ha -----						
NAD	537	131	64	731	0	50	50
Sumbar	137	83	72	292	10	416	426
Riau	153	146	51	351	76	1.376	1.452
Jambi	298	273	88	658	64	1.503	1.566
Bengkulu	78	130	21	229	33	459	492
Sumsel	264	279	170	714	104	2.168	2.272
Sulteng	36	57	27	120	28	170	198
Sulsel	78	130	21	229	33	459	492
Papua	0	0	1	1	1.845	4.173	6.018
Total	1.581	1.229	514	3.324	2.193	10.774	12.966

Sumber: Peta Kesesuaian Lahan untuk Padi Sawah skala 1:250.000 (Puslittanak, 1997)

Keterangan:

I1, I2, I3 = Lahan sesuai intensifikasi, berturut-turut untuk potensi tinggi, sedang, dan rendah

P1, P2 = Lahan sesuai untuk pengembangan/pencetakan sawah, berturut-turut untuk potensi tinggi dan sedang

Berdasarkan beberapa sumber data sumber daya lahan dan ketersediaan air sampai tahun 2020 yang telah dibahas di atas, sebetulnya masih terdapat lahan yang potensial untuk pengembangan atau pencetakan sawah baru, terutama di luar Jawa. Lahan-lahan potensial tersebut dominan terdapat di dataran rendah pada wilayah beriklim basah, baik pada tanah mineral maupun gambut, namun yang dominan berada pada lahan rawa. Lahan yang sesuai untuk pengembangan tersebut tentunya harus dilengkapi dengan sarana/infrastruktur yang dibutuhkan seperti pembuatan petakan, saluran irigasi, dan pengelolaan tanah dan air (pengaturan drainase untuk lahan rawa).

PENUTUP

Lahan basah di Indonesia mencakup luas 39,98 juta ha⁻¹, yang 24,56 juta ha⁻¹ (61,4%) diantaranya adalah lahan yang sesuai untuk lahan sawah. Lahan sesuai tersebut sebagian besar terdapat di Papua, Jawa, Sumatera, dan Kalimantan. Dari luasan tersebut termasuk lahan sawah yang telah ada sekitar 7,75 juta ha⁻¹ dan penggunaan lainnya diantaranya perkebunan kelapa sawit, kelapa, HTI, serta pemukiman dan perkotaan.

Potensi pengembangan lahan sawah di masa depan untuk memenuhi kebutuhan pangan nasional masih memberi peluang dengan memanfaatkan lahan basah yang terdapat cukup luas di beberapa wilayah. Namun demikian,

pengamanan tanaman-tanaman spesifik seperti sagu yang banyak dijumpai di lahan basah Kawasan Timur Indonesia dan bahkan sebagai makanan pokok masyarakat setempat harus tetap dilestarikan. Lahan yang sesuai untuk pengembangan tersebut tentunya harus dilengkapi dengan sarana/infrastruktur yang dibutuhkan seperti pembuatan petakan, saluran irigasi, dan pengelolaan tanah dan air (pengaturan drainase untuk lahan rawa).

DAFTAR PUSTAKA

- BAPPENAS. 1991. Pengkajian Kebijakan Strategi Pengembangan Sumberdaya Air Jangka Panjang di Indonesia. Seminar kerjasama Bappenas dan the Ford Foundation. Jakarta (Tidak dipublikasikan).
- BPS. 1983. Statistik Indonesia. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- BPS. 1993. Statistik Indonesia. Badan Pusat Statistik Jakarta.
- BPS. 2002. Statistik Indonesia. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- BPS. 2003. Statistik Indonesia. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- Direktorat Rawa. 1984. Kebijakan Departemen Pekerjaan Umum dalam rangka pengembangan daerah rawa. Diskusi Pola Pengembangan Pertanian Tanaman Pangan di Lahan Pasang Surut/Lebak. Palembang, 30 Juli–2 Agustus 1984. Dirjen Pengairan Departemen PU.
- Irawan, B., S. Friyatno, A. Supriyatna, I.S. Anugrah; N.A. Kitom, B. Rachman, and B. Wiryono. 2001. Perumusan Modal Kelembagaan Konversi Lahan Pertanian. Pusat Penelitian Sosial Ekonomi Pertanian, Bogor.
- Las, I., H. Pawitan, dan A. Sarnita. 1998. Potensi dan ketersediaan sumberdaya air untuk pembangunan pertanian pangan. Prosiding : Widyakarya Pangan dan Gizi. Ke XX. 1998. Badan Litbang Pertanian.
- Las, I., S. Purba, B. Sugiharto, dan A. Hamdani. 2000. Proyeksi kebutuhan dan pasokan pangan tahun 2000-2020. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Oldeman L.R., Irsal Las, and Muladi. 1980. Central Research Institute for Agriculture, Bogor, Indonesia.
- Pasandaran, E. dan B. Sugiharto. 1999. Kebutuhan pengairan bagi pengembangan agribisnis pangan, hortikultura, peternakan dan perikanan darat. Disampaikan pada Lokakarya Kebijakan Pengairan Untuk Mendukung Pengembangan Agribisnis. Jakarta, 8 Desember 1999 (Tidak dipublikasikan).
- Pawitan, H., J. S. Baharsjah, R. Boer, I. Amien dan B. D. Dasanto. 1996. Keseimbangan Air Hidrologi Wilayah Indonesia Menurut Kabupaten. Laporan Penelitian. Lembaga Penelitian-IPB dan Agricultural Research Management Project (ARMP) Badan Litbang Pertanian (Tidak dipublikasikan).

- Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. 2000. Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia, skala 1:1.000.000. Puslitbangtanak, Bogor.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. 2001. Atlas Arahana Tata Ruang Pertanian Nasional skala 1:1.000.000. Puslitbangtanak, Bogor.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. 2002. Atlas Pewilayahan Komoditas Pertanian Unggulan Nasional, skala 1:1.000.000. Puslitbangtanak, Bogor.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1997. Statistik Sumberdaya Lahan. Puslittanak, Bogor.
- Puslitbangtanak. 2002a. Peluang pengembangan lahan sawah mendukung pengembangan agribisnis berbasis tanaman pangan berdasarkan Atlas tata ruang pertanian Indonesia, skala 1:1.000.000. hlm. 46-54 *dalam* Penyusunan Data Sumberdaya Lahan untuk Mendukung Pembangunan Pertanian. Laporan Akhir No. 27/Puslitbangtanak/2002. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Puslitbangtanak. 2002b. Penyusunan Pewilayahan Komoditas dan Ketersediaan Lahan. Laporan Akhir No. 06/Puslitbangtanak/2002. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat.
- Puslitbangtanak. 2003. Arahana Lahan Sawah Utama dan Sekunder Nasional di P. Jawa, P. Bali dan P. Lombok. Laporan Akhir Kerjasama antara Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Litbang Pertanian dengan Proyek Koordinasi Perencanaan Peningkatan Ketahanan Pangan, Biro Perencanaan dan Keuangan, Sekretariat Jenderal Departemen Pertanian.
- _____, 1994b. Potensi Sumberdaya lahan untuk pencetakan sawah irigasi di lokasi PIADP Kalimantan dan Sulawesi. hlm. 1-12 *dalam* Risalah Hasil Penelitian Potensi Sumberdaya Lahan untuk Pengembangan Sawah Irigasi di Kalimantan dan Sulawesi. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Kerjasama Penelitian dengan Direktorat Bina Rehabilitasi dan Pengembangan Lahan, Deptan.
- Subagyo, H. 1998. Karakteristik Bio-fisik Lokasi Pengembangan Sistem Usaha Pertanian Pasang Surut, Sumatera Selatan. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor (Tidak dipublikasikan).
- Suharta, N. dan M. Soekardi. 1994a. Potensi sumberdaya lahan untuk pencetakan sawah irigasi di lokasi PIADP Sumatera. hlm. 1-14 *dalam* Risalah Hasil Penelitian Potensi Sumberdaya Lahan untuk Pengembangan Sawah Irigasi di Sumatera. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Kerjasama Penelitian dengan Direktorat Bina Rehabilitasi dan Pengembangan Lahan, Deptan.

- Swastika, D.K.S., P.U. Hadi, dan Ilham. 2000. Proyeksi Penawaran dan Permintaan Komoditas Tanaman Pangan: 2000-2010. Pusat Penelitian Sosial Ekonomi Pertanian, Bogor. 24 hlm.
- Swastika, D.K.S., P.U. Hadi, dan N. Ilham. 2000. Proyeksi Penawaran dan Permintaan Komoditas Tanaman Pangan: 2000-2010. Pusat Penelitian Sosial Ekonom Pertanian. 24 hlm.
- Widjaja-Adhi, I P.G. 1986. Pengelolaan lahan rawa pasang surut dan lebak .
Jurnal Litbang Pertanian V (1): 1-19.
- Widjaya-Adhi, I P.G. 1992. Tipologi, pemanfaatan dan pengembangan lahan pasang surut untuk kelapa. *Dalam*: Forum Komunikasi Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Kelapa Pasang Surut. Bogor, 28-29 Agustus 1992.

9. TEKNOLOGI PENGENDALIAN PENCEMARAN LAHAN SAWAH

Undang Kurnia, Husen Suganda, Rasti Saraswati, dan Nurjaya

Pencemaran lingkungan adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan, dan/atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau proses alam, sehingga kualitas lingkungan turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya (UU Republik Indonesia No 4 tahun 1982). Pencemaran terjadi pada tanah, air tanah, badan air atau sungai, udara, bahkan terputusnya rantai dari suatu tatanan lingkungan hidup atau penghancuran suatu jenis organisme yang pada akhirnya akan menghancurkan ekosistem (Soemarwoto, 1991).

Penyebab pencemaran pada lahan pertanian dapat digolongkan kedalam: (1) kegiatan nonpertanian, yaitu industri dan pertambangan dan (2) kegiatan pertanian, yaitu penggunaan bahan-bahan agrokimia. Pencemaran pada lahan sawah umumnya disebabkan oleh limbah industri, dan aktivitas budi daya yang menggunakan bahan-bahan agrokimia seperti pupuk dan pestisida yang kurang terkendali.

Banyaknya pabrik atau industri tekstil yang dibangun di sekitar lahan pertanian, telah menyebabkan tercemarnya lahan sawah, sehingga hasil gabah menjadi berkurang atau sama sekali tidak menghasilkan. Kondisi tersebut disebabkan oleh limbah industri tekstil yang dibuang ke badan air atau sungai, dan sungai tersebut sesungguhnya merupakan sumber air pengairan bagi lahan sawah yang ada di bagian hilir pabrik atau industri. Unsur-unsur kimia yang terbawa limbah, selanjutnya mengendap di dalam tanah, dan proses ini terus berulang dengan berjalannya waktu, sehingga terjadi akumulasi bahan berbahaya dan beracun (B₃), serta logam berat di dalam tanah. Oleh sebab itu, diperlukan teknologi untuk mengendalikan pencemaran yang terjadi pada tanah sawah.

Bahan berbahaya dan beracun (B₃) didefinisikan sebagai bahan yang termasuk ke dalam salah satu golongan atau lebih dari: (1) bahan beracun; (2) bahan peledak; (3) bahan mudah terbakar/menyala; (4) bahan oksidator dan reduktor; (5) bahan mudah meledak dan terbakar; (6) gas bertekanan; (7) bahan korosi/iritasi; (8) bahan radioaktif; dan (9) bahan beracun berbahaya lain yang ditetapkan oleh SK Menteri Perindustrian No.148/M/SK/4/1985). Dalam lampiran SK tersebut terdapat 90 jenis bahan atau barang yang tergolong beracun dan berbahaya. Sedangkan logam berat didefinisikan sebagai suatu kesatuan jenis logam yang

mempunyai bobot molekul dan berat jenis lebih besar dari 5 g cm^{-3} (Anonim, 1977) dengan nomor atom antara 22 dan 29 periode III dan IV. Menurut Palar (1994), karakteristik logam berat memiliki berat jenis >4 , bernomor atom 22-34 dan 40-50, serta mempunyai respon biokimia spesifik pada organisme hidup. Jenis logam berat diketahui >70 unsur, beberapa diantaranya perlu mendapat perhatian khusus, yaitu Hg, Pb, Cd, Cu, Cr, Co, Mo, Mn, dan Ni (Piotrowski and Coleman, 1980).

SUMBER PENCEMARAN PADA TANAH SAWAH

Dengan mengetahui sumber dan penyebab pencemaran, terutama yang terjadi pada lingkungan pertanian khususnya pada lahan sawah, maka upaya pencegahan dan penanggulangannya dapat diupayakan secara lebih tepat dan terarah. Berbagai sumber dan penyebab pencemaran yang dapat mengakibatkan mundurnya kualitas tanah sawah di antaranya penggunaan bahan-bahan agrokimia, masuknya limbah industri termasuk limbah industri pertanian, dan limbah kegiatan pertambangan.

Bahan-bahan agrokimia

Bahan-bahan agrokimia adalah pupuk dan pestisida yang digunakan secara luas di dalam budi daya pertanian. Dalam pertanian dikenal pupuk hara makro, baik primer maupun sekunder dan pupuk hara mikro, kesemuanya diperlukan tanaman dengan tingkat kebutuhan atau takaran penggunaan yang berbeda-beda tergantung jenis tanah dan jenis tanaman. Pupuk hara makro yang dibutuhkan tanaman, diantaranya adalah N, P, K, Ca, Mg, selain C, H dan O yang tersedia melimpah di alam berguna dalam fotosintesis, dan unsur hara mikro, seperti S, Zn, Co, Fe, Al, dan Si, yang dibutuhkan dalam jumlah sedikit; dalam konsentrasi tinggi, unsur-unsur tersebut bisa menyebabkan keracunan tanaman.

Pupuk nitrogen (N) di dalam tanah berada dalam berbagai bentuk, seperti NH_4 , NO_3 dan mudah mengalami berbagai perubahan. Sebagian dari pupuk menguap ke udara (volatilisasi), sebagian lagi hilang melalui pencucian atau erosi. Pemberian pupuk yang berlebihan dan tidak benar, seperti hanya disebarakan begitu saja, menyebabkan sebagian besar dari pupuk hilang terbawa aliran permukaan, dan masuk ke dalam sungai atau badan air. Keadaan ini tidak menguntungkan, karena pemupukan menjadi tidak efisien, sebaliknya terjadi pengkayaan N di dalam badan air, yang dicirikan oleh terjadinya eutrofikasi.

Berbagai jenis pupuk, baik anorganik maupun organik seperti pupuk P, pupuk N, pupuk kandang, kapur dan kompos mengandung logam berat (Tabel 1). Logam berat juga terdapat dalam batuan fosfat alam yang digunakan sebagai

bahan baku pembuatan pupuk P (Tabel 2). Pupuk organik dan kompos dibuat dari bahan organik, seperti bahan hijau tanaman, sampah kota, pupuk kandang, dan lain-lain. Pupuk organik yang berasal dari sampah kota dapat tercemar B₃ atau logam berat, karena berbagai macam limbah rumah tangga dan sampah kota yang terdiri atas sisa sayur-sayuran tercampur dengan baterai bekas, kaleng, seng, aluminium foil yang mengandung atau tercemar B₃. Selain pupuk P, bahan induk tanah juga mengandung logam berat (Tabel 3).

Tabel 1. Kadar logam berat dalam beberapa jenis pupuk anorganik dan organik

Logam berat	Pupuk P	Pupuk N	Pupuk kandang	Kapur	Kompos
	mg kg ⁻¹				
Arsen	2-1.200	2,2-120	3-25	0,1-25	2-52
Boron	5-115	-	0,3-0,6	10	-
Kadmium	0,1-170	0,05-8,5	0,1-0,8	0,04-0,1	0,01-100
Kobal	1-12	5,4-12	0,3-24	0,4-3	-
Kromium	66-245	3,2-19	1,1-55	10-15	1,8-4.110
Tembaga	1-300	-	2-172	2-125	13-3.580
Raksa	0,01-1,2	0,3-2,9	0,01-0,36	0,05	0.09-21
Timah (<i>lead</i>)	40-2.000	-	30-969	40-1.200	-
Mangan	0,1-60	1-7	0,05-3	0,1-115	-
Molibdenum	7-38	7-34	2,1-30	0-20	0,9-279
Nikel	7-225	227	1,1-27	20-1.250	1,3-2.240
Timah hitam	<100	-	-	-	-
Selenium	0,5	-	2,4	0,08-0,1	-
Uranium	30-300	-	-	-	-
Vanadium	2-1.600	-	-	20	-
Seng	50-1.450	1-42	15-566	10-450	82-5.894

Sumber: Setyorini *et al* (2003).

Mineralisasi N organik dan proses nitrifikasi di dalam tanah akan terhambat dengan kandungan logam berat 100-500 mg kg⁻¹ Pb, 10-100 mg kg⁻¹ Cd, 1-10 mg kg⁻¹ Hg (Doelman, 1986). Hasil penelitian Saraswati *et al.* (2003) mendapatkan kandungan Pb dan Cd dalam tanah sawah di Bekasi dan Karawang yang mengalami pencemaran limbah industri cukup tinggi. Kandungan Cd dalam tanah di Desa Sukajadi, Kecamatan Sukatani, Kabupaten Bekasi mencapai 0,3 ppm Cd, sedangkan kandungan Cd dan Pb dalam beras telah mencapai 0,2 ppm Cd dan 1,5 ppm Pb, mendekati batas kritis yang ditetapkan WHO, yaitu 0,24 ppm Cd dan 2 ppm Pb. Hasil penelitian tahun 1994/1995 di Desa Panjakan, Kecamatan Rajeg, Kabupaten Tangerang menunjukkan kandungan Cd dalam beras cukup tinggi, yaitu 0,367 ppm Cd. Hal tersebut sangat mengkhawatirkan, dan hasil penelitian tahun 2002 menunjukkan kandungan Cd tanah sawah di sembilan desa di Kabupaten Bekasi berkisar antara 0,121 dan 0,38 ppm, tertinggi di Desa Balong Ampel, Kecamatan Sukarahayu, Kabupaten Bekasi.

Penggunaan pestisida di dalam budi daya sayuran, khususnya komoditas bernilai ekonomis tinggi sangat intensif, dan diberikan dalam takaran tinggi dengan tujuan untuk menjamin keberhasilan produk sayuran tersebut. Hasil

penelitian menunjukkan, 30-50% dari total biaya produksi hortikultura digunakan untuk pestisida (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 1992). Data BP Bimas (1990), dan Soeyitno dan Ardiwinata (1999) menunjukkan adanya peningkatan penggunaan pestisida yang signifikan dari tahun 1978-1986 (Tabel 4). Penggunaan pestisida yang intensif dapat meninggalkan residu di dalam tanah dan tanaman, bahkan dapat masuk ke dalam tubuh hewan, ikan atau biota air lainnya. Pestisida dengan paruh waktu (*half life time*) degradasi yang lama dapat membahayakan kesehatan manusia dan mahluk hidup yang mengkonsumsi produk yang mengandung residu pestisida tersebut.

Tabel 2. Kadar unsur P dan logam berat dalam berbagai jenis batuan fosfat alam (PA) dari berbagai negara, dan dalam pupuk SP-36, serta pupuk kandang

Asal batuan fosfat alam	P ₂ O ₅		Cd	Cr	Pb
	Ekstraksi asam sitrat	Ekstraksi HCl 25%			
	%		mg kg ⁻¹		
PA <i>Chriasmast</i>	10,84	32,47	38	-	60
PA Tunisia	24,32	35,54	76	-	42
PA Senegal	10,96	35,58	113	-	55
PA Maroko	11,91	31,16	57	-	113
PA China Huinan	11,48	29,84	3	-	tu
PA China Guizhou	11,02	31,84	2	-	tu
PA Vietnam	7,35	35,16	tu	33	tu
PA Mesir	14,62	31,68	9	120	tu
PA Algeria	13,98	27,64	30	452	6
PA Jordan	12,68	30,66	5	344	tu
PA Maroko	15,13	30,67	75	164	tu
PA Senegal	8,39	22,26	79	315	tu
PA Togo	14,62	27,62	53	436	tu
PA Ciamis 1	29,40	35,51	28	20	tu
PA Ciamis 2	20,84	23,23	58	-	58
PA Sukabumi	9,05	9,10	65	-	65
PA Cileungsi	13,35	13,62	tu	-	tu
SP-36	33,80	36,29	11	4	tu
Pupuk kandang ayam	-	-	0,11	33	11
Pupuk kandang domba	-	-	0,44	67	9
Pupuk kandang kambing	-	-	tu	44	4
Pupuk kandang kuda	-	-	0,22	78	87
Pupuk kandang sapi	-	-	0,22	122	24

Sumber: Setyorini *et al* (2003); tu = tak terukur.

Tabel 3. Jenis-jenis batuan induk tanah dan kandungan Pb dan Cd didalamnya

Jenis batuan	Pb ¹	Cd ²
	-ppm	
Ultra basalt	1 – 14	0,01 – 0,12
Basalt	3 - 6	0,01 - 0,60
Granit	18 - 24	0,01 - 1,60
Sabs dan liat	20 - 23	0,017 -
Sabs hitam	20 - 30	11,00
Pasir	10 -	0,30 - 2,10
Kapur	12	0,019 -
	5 – 9	0,40
		0,007 –
		12

Davies (1990); ²Alloway (1990).

Tabel 4. Penggunaan pestisida untuk tanaman pangan di Indonesia, periode 1978-1987

Tahun	Insektisida	Fungisida	Rodentisida	Total
			x1.000 t	
1978	5.134	-	100	5.234
1979	6.252	-	-	6.525
1980	6.515	100	117	6.732
1981	8.565	100	75	8.831
1982	14.363	100	197	14.660
1983	14.236	732	150	15.118
1984	14.668	244	75	14.987
1985	15.563	237	88	15.880
1986	17.946	349	87	18.372
1987	8.851	733	43	9.627

Sumber: BP Bimas (1990); Soejitno dan Ardiwinata (2002).

Limbah industri

Industri di Indonesia umumnya dibangun pada kawasan pertanian yang subur. Selain mengurangi luas lahan pertanian, pembangunan industri seringkali menimbulkan permasalahan yang besar bagi lingkungan dan masyarakat sekitar, yaitu terjadinya pencemaran B₃ dan logam berat melalui limbahnya yang dibuang ke badan air/sungai.

Setiap industri menggunakan bahan baku utama dan bahan pembantu yang berbeda dalam proses produksinya. Di antara bahan baku yang digunakan ada yang mengandung bahan-bahan kimia berbahaya (Tabel 5), sehingga limbah yang

dihasilkan dapat mengandung unsur-unsur yang sama seperti bahan bakunya. Para pelaku industri biasanya membuang limbah ke dalam badan air atau sungai dengan atau tanpa melalui proses pengolahan limbah terlebih dahulu. Apabila air sungai tersebut dimanfaatkan untuk mengairi lahan pertanian atau sawah, di dalam tanah akan terjadi penimbunan B_3 dan logam berat. Dengan demikian, bersamaan dengan penyerapan unsur-unsur hara oleh tanaman, unsur-unsur racun tersebut juga ikut terserap tanaman dan pada akhirnya akan terakumulasi di dalam jaringan tanaman.

Beberapa industri tekstil, dalam proses produksinya menggunakan bahan-bahan kimia, seperti *sodium hydrophosphate* dalam proses pemutihan (*bleaching*). Demikian juga dalam proses pengolahan limbah digunakan bahan-bahan kimia tertentu, agar limbah yang dibuang aman dari bahan-bahan kimia yang digunakan dalam proses produksi. Namun demikian, data analisis limbah industri tekstil menunjukkan adanya sejumlah unsur B_3 dan logam berat, seperti Na, NH_4 , SO_4 , Fe, Al, Mn, Co, dan Ni yang potensial menyebabkan pencemaran (Tabel 6), terutama bila air limbah tersebut masuk ke dalam badan air atau sungai dan airnya digunakan sebagai sumber air irigasi.

Limbah industri pertanian

Limbah industri pertanian khususnya yang dihasilkan perkebunan-perkebunan besar cukup potensial mencemari lingkungan. Pabrik minyak kelapa sawit (*crude palm oil, CPO*) menghasilkan limbah padat, seperti ampas tandan dan buah, lumpur (*sludge*), serta limbah cair. Limbah cair mempunyai kemasaman atau pH sekitar 6-7, total padatan terlarut (*total suspended solid = TSS*) cukup tinggi, *biological oxygen demand (BOD)* dan *chemical oxygen demand (COD)* tinggi, minyak dan lemak serta bau tidak sedap, dan sangat potensial mencemari badan air dan lingkungan sekitarnya. Meskipun demikian, limbah pabrik tersebut mengandung unsur-unsur hara yang sangat berguna untuk meningkatkan kesuburan tanah, walaupun kandungannya tidak terlalu tinggi (Tabel 7). Oleh sebab itu, untuk mengurangi dampak negatif limbah cair pabrik kelapa sawit, maka limbah cair tersebut akan sangat bermanfaat bila digunakan sebagai irigasi tambahan bagi lahan perkebunan kelapa sawit itu sendiri, terutama pada saat tanaman membutuhkan air pada musim kemarau. Beberapa pabrik minyak kelapa sawit di Sumatera telah mengenal penggunaan air limbah pabrik minyak kelapa sawit untuk tambahan hara bagi lahan perkebunan itu sendiri.

Tabel 5. Jenis-jenis industri yang menghasilkan limbah mengandung B₃ dan logam berat

Jenis industri	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Al	Fe	Co	Mn
Plastik/resin	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-
Farmasi/kosmetik	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Klorin	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alat-alat kontrol/ukur	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektronika/elektrik	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektroplating	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-
Cat anti karat	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tekstil	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Keramik	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Penyamakan kulit	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Pulp dan kertas	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Baterai dan accu	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+
Sabun/detergen	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-
Logam, produk logam	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+
Pestisida	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-

Sumber: Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (2000).

+ ada; - tidak ada

Tabel 6. Kemasaman (pH) dan kandungan unsur (pencemar) dalam limbah salah satu industri tekstil di Jawa Barat, sebelum dan setelah melalui instalasi pengolahan limbah (IPAL)

pH dan unsur pencemar	Sebelum IPAL	Setelah IPAL	Baku mutu limbah (BML)
		mg l ⁻¹	
pH	9,28	6,46	6-9 ^a
NH ₄ ⁺	3,11	10,47	1-5 ^a
Na	680,02	559,78	60 ^b
Fe	0,17	0,54	5-10 ^b
Al	0,83	1,66	-
Mn	0,04	0,07	2-5 ^a
Cu	0,02	0,01	2-3 ^a
Zn	0,21	0,03	5-10 ^a
Pb	0,00	0,00	0,1-1,0 ^a
Cd	0,00	0,00	0,05-0,1 ^a
Co	0,02	0,02	0,4-0,6 ^a
Ni	0,02	0,02	0,2-0,5 ^a
Cr	0,00	0,00	0,05-0,5 ^a
SO ₄ ²⁻	961,40	741,50	-

Sumber: Ramadhi (2002).

^aBML Keputusan Gubernur Kepala Daerah Tingkat I Provinsi Jawa Barat No. 6 tahun 1999.

^bBML PP No.20 tahun 1990 tentang pencemaran air Gol. D.

- : BML tidak diketahui.

Penggunaan limbah cair eks industri pertanian seperti limbah CPO pada lahan sawah di Indonesia belum ada, tidak seperti yang dilakukan pada lahan perkebunan. Namun demikian, kemungkinan penggunaan limbah cair pabrik CPO sebagai tambahan air irigasi mempunyai peluang yang cukup baik. Pertimbangan tersebut didasarkan pada volume limbah yang dihasilkan cukup besar, mengandung unsur hara makro cukup, dan tidak mengandung unsur-unsur kimia berbahaya, kecuali minyak dan lemak, padatan terlarut, dan bau (Tabel 7).

Tabel 7. Sifat-sifat fisika dan kimia limbah pabrik minyak kelapa sawit (CPO) yang siap dibuang ke lingkungan setelah melalui proses pengolahan limbah

Parameter-parameter limbah	Satuan	Nilai
Suhu	°C	28
Warna	PtCo	41,50
Total padatan terlarut	mg l ⁻¹	780
pH	-	6,35
Oksigen terlarut	mg l ⁻¹	1,20
BOD	mg l ⁻¹	630
COD	mg l ⁻¹	3.535
Minyak dan lemak	mg l ⁻¹	15,40
N-total	%	0,24
NO ₃ -N	mg l ⁻¹	2,19
C-organik	mg l ⁻¹	14,80
Kalsium	mg l ⁻¹	29,80
Magnesium	mg l ⁻¹	3,70

Sumber: PT Sawindo Kencana, 2002, (hasil analisis contoh limbah setelah melalui IPAL, diambil dari

kolam terakhir).

PENCEMARAN PADA LAHAN SAWAH

Bahan agrokimia

Pupuk nitrogen, di dalam tanah mengalami proses nitrifikasi atau denitrifikasi tergantung kondisi tanah, menghasilkan gas N_2O yang dilepaskan ke atmosfer dan ikut berperan dalam meningkatkan emisi gas rumah kaca (GRK), sehingga berdampak terhadap pemanasan global. Emisi N_2O dari tanah ke atmosfer tidak secara langsung menyebabkan pencemaran pada lahan pertanian termasuk lahan sawah, namun akibat perubahan iklim global dapat menyebabkan penurunan produktivitas pertanian.

Pupuk P yang digunakan dalam budi daya pertanian dapat menyebabkan pencemaran pada tanah, karena pupuk tersebut mengandung logam berat (Tabel 1 dan 2). Dalam pertumbuhannya, tanaman menyerap unsur hara dari dalam tanah, termasuk logam berat, sehingga produk atau hasil pertanian dapat mengandung logam berat. Kondisi seperti ini akan berdampak buruk terhadap kesehatan konsumen. Sampai saat ini, belum ada nilai ambang batas konsentrasi logam berat di dalam tanah yang aman bagi produk pertanian yang dihasilkan. Oleh sebab itu, sekecil apapun konsentrasi logam berat, baik di dalam tanah maupun dalam produk/hasil pertanian harus mendapat perhatian yang serius, karena dalam jangka panjang dapat menyebabkan pencemaran dakhil akibat mengkonsumsi produk/hasil pertanian yang tercemar secara terus-menerus.

Tabel 8. Konsentrasi residu insektisida pada tanah sawah di Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur

Insektisida	Jawa Barat ^a	Jawa Tengah ^b	Jawa Timur ^c	BMR ^d
	ppm			
Organofosfat				
▪ Klorpirifos	0,0014-0,0401	0,0022-0,0971	0,0007-0,0035	0,10
▪ Diazinon	0,0415-0,0602	0,0080-0,0465	0,0015-0,0040	0,10
▪ Fention	0,0326-0,0450	0,0326-0,0450	-	0,10
Organoklorin				
▪ BHC	0,0009-0,0375	0,0011-0,0263	-	0,05
▪ Endosulfan	0,0003-0,0360	0,0102-0,0343	0,0015-0,0055	1,00
▪ Aldrin	0,0110-0,0194	0,0020-0,0185	-	0,02
Karbamat				
▪ Karbofuran	0,0013-0,0563	-	0,0008-0,0032	0,20
▪ BPMC	0,0037-0,0410	-	0,0025	0,10
▪ Fenvalerat	-	0,0088-0,0205	-	2,00

Sumber: ^aArdiwinata *et al.* (1999); ^bJatmiko, *et al.* (1999); ^cHarsanti *et al.* (1999).

^dBMR = batas maksimum residu (SK Bersama Menteri Pertanian dan Menteri Kesehatan, 1996).

Pestisida yang digunakan dalam budi daya pertanian meninggalkan residu

pada tanah, air, biji atau buah, dan tanaman, bahkan sampai badan air/sungai dan perairan umum (Tabel 8, 9, dan 10). Dalam tabel-tabel tersebut terlihat bahwa residu pestisida umumnya masih jauh di bawah batas maksimum residu (BMR), kecuali residu aldrin pada bawang merah (Tabel 10) sudah melebihi BMR. Namun demikian dalam konsentrasi sangat rendah, logam berat akan terakumulasi di dalam tubuh makhluk hidup, dan lambat laun akan berpengaruh buruk terhadap kesehatan. Manusia yang mengkonsumsi hasil atau produk pertanian yang mengandung residu pestisida, dalam jangka panjang diperkirakan akan terkena dampak berupa kanker (sebagian besar pestisida bersifat karsinogenik), gangguan metabolisme steroid akibat *endocrine disrupting pesticides (EDPs)*, fungsi tiroid, spermatogenesis, hormon gonadotropik, aktivitas oestrogenik, dan aktivitas anti-androgenik.

Tabel 9. Konsentrasi residu insektisida pada beras dari lahan sawah di Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur

Insektisida	Jawa Barat ^a	Jawa Tengah ^b	Jawa Timur ^c
	ppm		
Organofosfat			
▪ Klorpirifos	0,0002-0,0016	0,0028-0,0970	0,0002-0,0008
▪ Diazinon	-	0,0142-0,0556	0,0002-0,0003
▪ Fention	-	0,0246-0,0372	-
Organoklorin			
▪ BHC	0,0023-0,0024	0,0024-0,0466	0,0003-0,0006
▪ Endosulfan	0,0002-0,0005	0,0157-0,0357	-
▪ Aldrin	-	0,0037-0,0199	-
Karbamat			
▪ Karbofuran	0,0005-0,0013	-	0,0003
▪ BPMC	0,0004-0,0059	-	-
▪ Fenvalerat	-	0,0163-0,0212	-

Sumber: ^aArdiwinata *et al.* (1999); ^bJatmiko *et al.* (1999); ^cHarsanti *et al.* (1999).

Tabel 10. Konsentrasi residu insektisida di dalam tanah, tanaman, dan air dari lahan pertanaman bawang merah di Kabupaten Brebes, Jawa Tengah

Insektisida	Residu insektisida		
	Tanah	Bawang merah	Air
	ppm		
Organofosfat			
▪ Klorpirifos	0,0022-0,0813	0,0413-0,1849	0,0015-0,0094
▪ Metidation			
▪ Profenos	0,0072-0,0214	0,0048-0,1247	0,0001-0,0008
▪ Fenitrothion			
Organoklorin	0,0011-0,0017	0,0271-0,0371	ttd

▪ Lindan	0,0028-0,0082	0,0230-0,0695	0,0003-0,0021
▪ Aldrin			
▪ Dieldrin			
▪ Endosulfan	0,0205-0,0277	0,0076-0,6942	0,0002-0,0457
	0,0041-0,0456	0,3422-2,1220	0,0001-0,0031
	0,0078-0,0261	0,0103-0,0156	0,0039-0,0042
	0,0093-0,0195	0,0311-0,1134	0,0015-0,0040

Sumber: Nurjaya (2003); ttd = tidak terdeteksi

Limbah industri

Di Indonesia khususnya di Pulau Jawa, dampak pencemaran limbah industri yang pernah dirasakan adalah gatal-gatal, pusing dan mual, gangguan pernafasan, bau menyengat, dan satu-dua kasus kematian manusia, meskipun penyebabnya belum jelas terungkap, serta kasus pencemaran dan kerusakan pertanian padi sawah di persawahan Kecamatan Rancaekek di Kabupaten Bandung (Suganda *et al.*, 2003).

Penggunaan air sungai yang tercemar oleh limbah industri sebagai sumber air pengairan merupakan salah satu penyebab tercemarnya lahan sawah. Pencemaran pada lahan pertanian atau sawah oleh limbah yang mengandung logam berat sampai tingkat tertentu, biasanya tidak menyebabkan berkurangnya hasil tanaman, kecuali untuk unsur logam berat yang berperan sebagai unsur hara mikro. Namun, bila logam berat tersebut masuk ke dalam produk/hasil pertanian, dapat menyebabkan pencemaran dakhil bagi yang mengkonsumsi secara terus-menerus produk atau hasil pertanian tersebut.

Pencemaran pada tanah sawah

(a) Pencemaran tanah akibat limbah industri tekstil

Pencemaran yang diakibatkan oleh limbah industri diawali dari sungai tempat dibuangnya limbah. Permasalahan akan timbul ketika sungai tersebut digunakan sebagai sumber air pengairan untuk mengairi lahan sawah yang berada di bagian hilir, sebagian meresap ke dalam tanah dan menguap ke udara serta yang digunakan untuk fotosintesis.

Pencemaran di dalam tanah tidak bisa segera terlihat, dan untuk beberapa unsur kimia, terutama logam berat tidak membahayakan tanah, dan tidak menyebabkan gangguan fisiologis pada tanaman. Namun, pencemaran tersebut dapat berdampak lebih jauh, yaitu masuknya unsur-unsur logam berat atau pencemar lain ke dalam tanah. Selanjutnya secara alami, unsur-unsur tersebut akan terserap dan masuk ke dalam jaringan tanaman bersama-sama dengan unsur hara dan air yang dibutuhkan tanaman untuk fotosintesis, sehingga produk pertanian yang dihasilkan dan dikonsumsi manusia dapat menimbulkan gangguan kesehatan.

Salah satu contoh kasus pencemaran di lahan persawahan sekitar industri tekstil di Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung adalah akibat limbah industri tersebut mengandung logam berat dan B₃, menyebabkan pertanaman padi mengalami kerusakan dan gagal panen khususnya di musim kemarau (Ramadhi, 2002; Suganda *et al.*, 2003). Lahan sawah yang tercemar mencapai hampir 1.250 ha atau sekitar 15% dari total luas sawah di daerah tersebut. Kasus kerusakan sebagian besar tanaman padi dan gagal panen di persawahan Rancaekek tersebut disebabkan karena tingginya kandungan Na di dalam tanah sawah, yang berkisar antara 467-2.983 mg N kg⁻¹ tanah (bandingkan dengan tanah yang tidak tercemar hanya 97 mg Na kg⁻¹ tanah (Tabel 11). Gambar 1 memperlihatkan kondisi pertanaman padi di persawahan Rancaekek yang mengalami pencemaran akibat limbah industri tekstil. Tabel 11 juga memperlihatkan konsentrasi Cr, Co, Ni, Cu, dan Zn berada di sekitar batas kritis. Meskipun demikian, unsur-unsur logam berat lain yang berada di bawah batas kritis, tetap harus mendapat perhatian serius, karena dalam konsentrasi yang sangat rendahpun, produk pertanian yang tercemar dapat menyebabkan gangguan kesehatan akibat terus-menerus dikonsumsi.

Tabel 11. Kandungan unsur pencemar dan logam berat dalam tanah tercemar limbah industri tekstil di persawahan Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung

Unsur pencemar dan logam berat	Tanah tercemar	Tanah tidak tercemar	Batas kritis ¹
		mg kg ⁻¹	
Na	467-2.983	97	60
Zn	39-237	80	70-400
Cu	49-79	44	60-125
Pb	11-20	14	100-400
Cd	0,19-0,30	0,12	3-8
Cr	9-34	13	75-100
Co	14-27	-	25-50
Ni	14-21	-	20

Sumber: Ramadhi (2002).

¹Alloway (1990).

-^aTidak ada data.



Gambar 1. Kerusakan tanaman padi sawah akibat limbah industri tekstil di Desa Jelegong, Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung (Foto: Undang Kurnia).

(b) Pencemaran tanah akibat limbah industri penyepuhan logam

Walaupun tidak menyebabkan pencemaran dan terganggunya pertumbuhan tanaman padi, limbah industri penyepuhan logam (*electroplating*) telah mencemari tanah sawah yang terdapat di sekitar industri kerajinan rumah tangga di Kecamatan Juwana, Kabupaten Pati, Provinsi Jawa Tengah. Kandungan Co, Cr, Mn, dan Ni pada tanah umumnya lebih tinggi dari nilai batas kritis unsur-unsur tersebut. Luas dan penyebaran lahan sawah yang tercemar logam berat tersebut disajikan dalam Tabel 12. Lain halnya dengan unsur-unsur logam berat dan pencemar lain seperti yang tercantum dalam Tabel 12, kandungan Pb dan Cd di dalam tanah masih di bawah batas kritis.

Tabel 12. Luas lahan sawah tercemar beberapa unsur logam berat yang berasal dari limbah *electroplating* di Kecamatan Juwana, Kabupaten Pati, Provinsi Jawa Tengah

Logam berat	Tercemar		Tidak tercemar		Batas kritis	Total
	Luas	Konsentrasi	Luas	Konsentrasi		
	ha	mg kg ⁻¹	ha	mg kg ⁻¹	ppm	ha
Co	2.100	10,7-38,9	638	7,9-8,2	10	2.738
Cr	595	6,0-27,7	2.143	0,6-2,1	2,5	2.738
Mn	297	1.782-2.414	2.441	403-1.282	1.500	2.738
Ni	131	20,8-22,2	2.607	9,4-18,0	20	2.738

Sumber: Undang Kurnia *et al.* (2003b).

Pencemaran pada badan air

Akibat limbah industri yang dibuang ke dalam badan air atau sungai yang berada di sekitar industri atau pabrik, maka badan air tersebut akan tercemar unsur-unsur yang sama dengan yang digunakan dalam proses produksi dan pengolahan limbah. Hasil analisis unsur-unsur pencemar dan logam berat dalam contoh air sungai yang digunakan sebagai sumber air pengairan menunjukkan kandungan B₃ dan logam berat tersebut masih di bawah batas kritis (Tabel 13), kecuali Na dan SO₄. Akan tetapi, bila contoh air diambil dari bagian dasar sungai

yang bercampur lumpur, ternyata kandungan Pb, Cr, Co, Ni, Zn, dan Cu umumnya melebihi batas kritis logam berat dalam air (Tabel 13, Sungai Cikijing^b). Tingginya kandungan logam berat dalam lumpur di dasar sungai, diduga karena proses pengendapan yang terjadi terus-menerus. Oleh sebab itu, dapat dipastikan tingginya kandungan Cr, Co, Ni, dan Zn dalam tanah sawah adalah akibat penggunaan air sungai yang secara terus-menerus sebagai sumber air pengairan.

Pencemaran pada jaringan tanaman dan hasil

Bila menggunakan kriteria batas kritis dari Ministry of State for Population and Environment of Indonesia and Dalhousi University, Canada, 1992, kandungan logam berat dalam jerami dan beras dari lahan persawahan yang tercemar limbah industri umumnya masih di bawah batas kritis (Tabel 14). Konsentrasi Pb dan Cd di dalam beras masih rendah, dengan batas kritis, masing-masing 1,0 dan 0,5 ppm (Direktorat Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan, 1989). Namun demikian, keberadaan kedua unsur logam berat tersebut dan unsur-unsur logam berat lainnya di dalam hasil atau produk pertanian yang tercemar perlu diperhatikan dan diwaspadai. Seperti telah diketahui bahwa Hg, Pb, dan Cd merupakan unsur logam berat yang berbahaya bagi syaraf dan kesehatan manusia.

Tabel 13. Kemasaman (pH) air, unsur pencemar dan logam berat dalam air Sungai Cikijing yang digunakan sebagai sumber air pengairan

Unsur kimia, pencemar dan logam berat	S. Cikijing ^a	S. Cikijing ^b
	mg l ⁻¹	
pH	7,2	7,2
Na	580	583
NO ₃	1,9	1,9
PO ₄	1,7	2,1
SO ₄	980	966
Zn	0,03	65,7
Cu	0,01	8,7
Pb	0,00	21,1
Cd	0,00	0,16
Cr	0,00	25,5
Co	0,02	28,2
Ni	0,04	43,0

Sumber: Suganda *et al.*, (2003).

^aLimbah yang dianalisis adalah contoh bebas lumpur (filtrat).

^bLimbah yang dianalisis adalah contoh larutan lumpur.

Tabel 14. Kandungan logam berat di dalam jerami padi dan beras dari lahan sawah tercemar industri penyepuhan logam di Juwana, Pati-Jawa Tengah, dan dari industri tekstil di Rancaekek, Bandung-Jawa Barat

Unsur logam berat	Kandungan dalam			
	Jerami padi		Beras	
	Juwana ^a	Rancaekek ^b	Juwana ^a	Rancaekek ^b
	ppm			
Zn	20-93	17-	19-26	14-23
Cu	2-16	64	1-4	2-7
Pb	0,10-	2-13	0,42-	0,09-0,92
Cd	2,40	0,71-	0,53	0,03-0,18
Co	0,01-	5,38	0,05-	0,11-4,16
Cr	0,08	0,03-	0,07	0,99-17,1
Ni	0,27-	0,35	0,30-	0,61-17,1
	0,65	0,11-	0,40	
	0,16-	5,92	0,33-	
	1,29	0,67-	1,15	
	0,85-	4,52	0,86-	
	1,37		1,12	
		0,44-		
		15,90		

Sumber: ^aUndang Kurnia *et al.* (2003b); ^bSuganda *et al.* (2003).

Sismiyati *et al.* (1993) dan Nasution dan Sismiyati (1996) mendapatkan bahwa kandungan Cd dalam beras pecah kulit di Kabupaten-kabupaten Tangerang, Cianjur, Bandung, Sumedang, Garut, dan Kecamatan Tanggungan dan Tanon, Jawa Tengah sudah melebihi batas kritis yang ditetapkan WHO. Sejak tahun 1998 diketahui bahwa kandungan Cd, Cu, Pb, dan Hg pada bulir padi di lahan sawah Sukoharjo, Sragen, dan Karanganyar yang mendapatkan irigasi dari Bengawan Solo, berturut-turut 5,7; 5,6; 13,6; dan 0,62 ppm. Ambang batas kandungan logam berat dalam beras yang ditetapkan WHO adalah 0,24 ppm untuk Cd; 0,20 ppm Cu; 2,0 ppm Pb; dan 0,1 ppm Hg, serta pada tanah 3-10 ppm untuk Cd, dan 300 ppm untuk Fe. Dengan demikian, kandungan Cd, Cu, dan Pb dalam gabah dari lahan sawah di Kabupaten Sukoharjo, Sragen, dan Karanganyar telah melebihi ambang batas pencemaran yang ditetapkan.

Kegiatan pertambangan

Pertambangan, terutama yang dilakukan secara terbuka (*open mining*)

sangat merusak lingkungan, karena untuk memperoleh bahan atau bijih tambang, tanah lapisan atas harus dikupas, dan tanah dibawahnya digali termasuk bahan induk/batu-batuan tanah yang menutupi lapisan/endapan tambang, sehingga menyebabkan perubahan bentang alam. Selain itu, untuk memperoleh atau melepaskan biji tambang dari batu-batuan atau pasir seperti dalam pertambangan emas, para penambang umumnya menggunakan bahan-bahan kimia berbahaya yang dapat mencemari tanah, badan air atau sungai dan lingkungan. Apabila badan air atau sungai tersebut digunakan sebagai sumber air pengairan, maka lahan pertanian tersebut akan ikut tercemar.

(a) Pertambangan batu bara

Kegiatan penambangan batu bara dapat menyebabkan terlepasnya unsur-unsur kimia tertentu seperti Fe dan S dari senyawa pirit (Fe_2S), menghasilkan asam tambang yang dapat hanyut terbawa aliran permukaan pada saat hujan, dan masuk ke lahan sawah di bagian hilir areal pertambangan, sehingga menyebabkan kemasaman tanahnya lebih tinggi. Tanah dan air asam tambang tersebut sangat masam, dengan pH berkisar antara 2,5-3,5 yang berpotensi mencemari lahan pertanian.

Salah satu daerah pertambangan batu bara yang cukup besar di Indonesia berada di Provinsi Kalimantan Selatan. Bila dibandingkan dengan provinsi lain di Indonesia, pertambangan batu bara di Provinsi Kalimantan Selatan sangat merusak lingkungan dan lahan pertanian yang ada di provinsi tersebut, terutama pertambangan yang dilakukan secara ilegal. Selain menghasilkan asam tambang yang dapat memasamkan tanah, penggalian tanah dan batu-batuan yang menutup lapisan batu bara dilakukan secara tidak terkendali, dan penumpukan hasil galian (*overburden*) tidak mengikuti prosedur yang telah ditetapkan pemerintah. Akibatnya lahan dengan tumpukan tanah, dan batu-batuan eks pertambangan sangat sulit untuk ditumbuhi vegetasi.

(b) Pertambangan emas

Penambangan emas ilegal atau tanpa izin (PETI) biasanya dilakukan dengan membuat lubang-lubang terowongan di dalam tanah dalam suatu areal perbukitan tanpa konstruksi terowongan yang baik, dan secara umum lokasinya berdekatan dengan lokasi penambangan legal (resmi), atau di sepanjang sungai dan jalur aliran sungai. Cara yang dilakukan penambang liar tersebut sangat berisiko, karena bisa menyebabkan longsor serta ambruknya tanah dan menutup terowongan, sehingga membahayakan keselamatan para penambang. Sedangkan penambangan emas di sekitar areal pertanian dan yang dilakukan di dalam/jalur sungai, seperti di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah telah menyebabkan kerusakan dan sedimentasi pada lahan pertanian akibat lumpur yang terbawa oleh aliran permukaan, dan longsor pada tebing-tebing sungai menyebabkan lalu lintas angkutan sungai terganggu, dan terjadi penyempitan alur

sungai karena banyaknya bangunan dan alat pertambangan di dalam sungai. Selain itu, bahan kimia yang digunakan untuk melepaskan bijih emas ikut hanyut terbawa aliran sungai, dan masuk ke lahan pertanian atau lahan sawah akibat digunakannya air sungai sebagai sumber air pengairan, seperti yang terjadi di Gunung Pongkor, Jawa Barat (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 2000), dan/atau perairan umum yang dapat mencemari biota air termasuk ikan.

Penambang emas tanpa izin umumnya menggunakan air raksa (merkuri, Hg) untuk mendapatkan emas, yaitu dengan cara mendulang (menggelondong) batu-batuan yang mengandung bijih emas selama 6-8 jam, kemudian menyaring hasil pendulangan dengan bantuan air raksa. Berdasarkan cara pendulangan dan pengelolaan limbah yang sederhana, kemungkinan tercemarnya lahan sawah di sekitar tempat pendulangan sangat tinggi. Pertambangan resmi, seperti PT Aneka Tambang di Gunung Pongkor, Bogor tidak lagi menggunakan merkuri sebagai bahan untuk memisahkan bijih emas dari pasir atau batu-batuan.

Hasil penelitian Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (2000) di sekitar areal pertambangan emas Gunung Pongkor, Bogor menunjukkan bahwa tanah-tanah pada lahan sawah yang berada pada jalur aliran Sungai Cikaniki dan Sungai Cisarua telah tercemar limbah pendulangan emas yang mengandung Hg, dengan konsentrasi cukup tinggi (Tabel 15). Tanaman padi sawah dengan konsentrasi Hg di dalam tanah tinggi, tidak menimbulkan gangguan/kerusakan morfologis tanaman. Akan tetapi, bila tanah mengandung Hg tinggi, jerami dan beras yang dihasilkan dari tanah tersebut cenderung mengandung Hg yang tinggi pula.

Hasil penelitian Tim Universitas Andalas, Sumatera Barat, menyebutkan bahwa air Sungai Malandu dan Sungai Musus di Desa Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat sudah tercemar merkuri (Hg) dengan tingkat pencemaran sangat membahayakan kesehatan manusia (Kompas, 19 Januari 2001), karena sungai tersebut digunakan sebagai tempat pembuangan limbah penambangan emas. Kadar Hg dalam air sungai tersebut 0,172 ppm, dan kadar besi (Fe) mencapai 17,06 ppm. Nilai ambang batas atau baku mutu lingkungan untuk Hg dalam air adalah 0 ppm, sedangkan untuk Fe sebesar 1 ppm. Oleh sebab itu, hasil gabah dari lahan sawah yang mendapat air pengairan dari kedua sungai yang tercemar perlu diwaspadai, karena selain kedua unsur logam berat tersebut telah melebihi ambang batas, juga bila produk pertanian tersebut dikonsumsi akan berpengaruh buruk terhadap kesehatan konsumen.

Tabel 15. Konsentrasi merkuri (Hg) dalam tanah, tanaman, dan jerami padi di lahan persawahan sekitar areal penambangan emas tanpa izin Gunung Pongkor, Bogor¹

Lokasi	Jarak dari lokasi pengolahan km	Konsentrasi Hg dalam		
		Tanah	Jerami padi	Beras
		ppm		

Budin	0,10	6,73	5,34	0,43 ^a
Ciiris	0,75-1,00	td	1,83	ta
Bantarjati	1,20-1,50	1,79	0,84	< 0,0005 ^a
Kalongliud	7,00-7,50	2,36	ta	0,25 ^b
Sibanteng	11,5-12,00	1,27	ta	< 0,0005 ^b

¹Sumber: Tim Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (2000); Baku mutu Hg dalam tanah 1,8 ppm.

ta: tidak ada contoh; td: tidak dianalisis; ^agabah diambil langsung dari lahan petani; ^bgabah dari hasil panen petani 1-3 Februari 2000.

(c) Pertambangan minyak bumi

Pertambangan minyak bumi yang berada di lahan pertanian atau sekitarnya dapat menyebabkan kerusakan tanaman. Salah satu contoh dampak tersebut adalah meluapnya limbah pengeboran minyak bumi yang terjadi di Desa Sukamaju, Kecamatan BKL Terawas, Kabupaten Musi Rawas, Sumatera Selatan pada tahun 1986 yang menyebabkan kerusakan tanaman padi. Luas dan tingkat kerusakan tanaman padi mencapai 6,25 ha berat, 31,50 ha sedang, dan 15,50 ha ringan. Meskipun luas sebaran dampak relatif kecil, namun pengaruhnya terhadap hasil gabah cukup signifikan. Hasil gabah pada lahan sawah dengan tingkat kerusakan berat hanya mencapai 0,2 t ha⁻¹, sedangkan hasil gabah pada lahan sawah dengan tingkat kerusakan sedang 3-4 t ha⁻¹. Hasil gabah normal dari lahan sawah di areal tersebut sekitar 6,5-7,0 t ha⁻¹ (Sukmana *et al.*, 1986). Gabah yang dihasilkan dari lahan sawah tercemar berat mudah hancur saat digiling. Diduga, pencemaran tersebut menyebabkan terhambatnya proses fotosintesa, dan masuknya senyawa hidrokarbon ke dalam jaringan tanaman.

Dampak ekonomi kerusakan lahan sawah

Pencemaran limbah industri tekstil seperti yang terjadi pada lahan persawahan di Kecamatan Rancaekek menyebabkan menurunnya hasil gabah secara drastis, terutama di musim kemarau. Dalam kondisi sebelum terjadi pencemaran, hasil gabah rata-rata di persawahan tersebut mencapai 6-7 ton gabah kering ha⁻¹ musim⁻¹. Setelah terjadi pencemaran akibat digunakannya air Sungai Cikijing yang tercemar limbah industri tekstil sebagai sumber air pengairan, hasil gabah hanya mencapai sekitar 1-2 t ha⁻¹ musim⁻¹ khususnya di musim kemarau, bahkan banyak diantara para petani yang tidak panen. Dengan terjadinya penurunan hasil gabah sebesar 5 t ha⁻¹, maka bila dihitung dengan nilai uang, terjadi kerugian sebesar Rp 6.000.000.- ha⁻¹ khususnya pada musim

kemarau (asumsi harga gabah kering giling Rp 1.200 kg⁻¹). Berdasarkan penelitian Suganda *et al.* (2003), lahan sawah di Kecamatan Rancaekek yang tercemar limbah industri tekstil mencapai 1.250 ha. Oleh sebab itu, Kecamatan Rancaekek khususnya Desa Linggar, Jelegong, dan Babakan Jawa pada musim kemarau menderita kerugian sebesar 7,5 milyar rupiah.

TEKNOLOGI PENANGGULANGAN PENCEMARAN PADA LAHAN SAWAH

Selama ini pandangan masyarakat umum terhadap pencemaran selalu identik dengan pengaruh logam berat dan B₃, dampak terhadap kesehatan manusia, perubahan iklim dan kualitas udara, pencemaran badan air atau sungai dan perairan umum, dan lain-lain. Dampak pencemaran terhadap lahan pertanian masih sangat sedikit mendapat perhatian dan masih terbatasnya upaya pengendalian yang dilakukan, padahal dengan tercemarnya lahan-lahan pertanian berarti hasil atau produk pertanian dari lahan tersebut juga ikut tercemar. Oleh sebab itu, pengendalian pencemaran lingkungan pertanian, khususnya pada lahan sawah harus mendapatkan perhatian secara serius. Dengan mengetahui sumber dan penyebab pencemaran pada lahan sawah, maka dapat dilakukan dengan segera langkah awal yang harus dilakukan dalam menanggulangi pencemaran tersebut.

Pengaruh buruk pencemaran pada lahan sawah sangat kecil kemungkinannya untuk dihilangkan, namun dapat dikurangi atau diminimalkan. Oleh sebab itu, teknologi pengendalian pencemaran yang akan diterapkan harus mempunyai target yang jelas, sampai seberapa besar beban pencemaran yang diterima oleh tanah/lahan pertanian akan dikurangi atau diminimalkan.

Salah satu prinsip dasar yang harus diterapkan dalam upaya-upaya pengendalian pencemaran adalah dengan menetapkan batas kritis atau ambang batas pencemaran, baik yang disebabkan oleh B₃ dan logam berat maupun pencemar lain di dalam tanah, sehingga produk atau hasil pertanian dari lahan pertanian yang tercemar aman bagi konsumen. Oleh karena batas kritis/ambang batas pencemaran pada tanah, air, tanaman dan produk pertanian belum ada atau belum ditetapkan untuk kondisi Indonesia, maka batas kritis atau ambang batas pencemaran yang tertera pada Tabel 16 dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk mengingatkan telah terjadi pencemaran di suatu daerah, sehingga arahan penanggulangannya dapat ditetapkan.

Tabel 16. Batas kritis unsur-unsur logam berat dalam tanah, air, tanaman, dan beras

Unsur logam berat	Tanah ¹	Air ²	Tanaman ³	Beras/tepung ⁴
-------------------	--------------------	------------------	----------------------	---------------------------

	ppm			
Pb	100	0,03	50	1,0
Cd	0,50	0,05-0,10	5-30	0,5
Co	10	0,4-0,6	15-30	-
Cr	2,5	0,5-1,0	5-30	-
Ni	20	0,2-0,5	5-30	-
Cu	60-125	2-3	20-100	10
Mn	1.500	-	-	-
Zn	70	5-10	100-400	40

Sumber: ¹Ministry of State for Population and Environment of Indonesia, and Dalhousie University, Canada, (1992).

²Pemerintah Republik Indonesia (1990).

³Alloway (1993).

⁴Direktorat Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan (1989).

Dengan memperhatikan sumber pencemar, penyebab dan dampak pencemaran yang terjadi, maka upaya penanggulangan pencemaran lahan sawah dapat dilakukan secara fisik, kimia, dan biologi atau kombinasi dua atau lebih cara-cara tersebut.

Penanggulangan secara fisik

Penanggulangan pencemaran secara fisik dilakukan agar pengaruh B₃ dan logam berat yang terkandung dalam tanah berkurang. Upaya-upaya yang dapat dilakukan, diantaranya adalah dengan teknik pemanasan dan penyerapan menggunakan arang aktif, zeolit, dan bentonit, ataupun penggunaan limbah pertanian (Endrawanto dan Winarno, 1996), pengolahan tanah dan teknik pengairan (Suharsih *et al.*, 2000) pencucian atau drainase (Sukmana *et al.*, 1986; Undang Kurnia *et al.*, 2003a).

Lahan sawah yang terkena pencemaran limbah pengeboran minyak bumi dapat diatasi atau ditanggulangi dengan pencucian dan penggunaan bahan organik (Sukmana *et al.*, 1986). Prinsip dasar penelitian tersebut adalah bahwa senyawa hidrokarbon yang meracuni tanaman dapat dihilangkan dengan pencucian dan/atau dibuat menjadi tidak aktif oleh bahan organik bila unsur-unsur racun tersebut berasal dari logam berat. Pencucian dilakukan dengan cara memasukkan air irigasi atau air sungai yang tidak tercemar ke lahan sawah yang terkena limbah pada saat pengolahan tanah, kemudian membuang air tersebut melalui parit drainase. Hasil penelitian menunjukkan, bahwa bahan organik tidak berpengaruh terhadap tinggi tanaman, jumlah anakan dan hasil gabah. Namun, pencucian dengan air sungai yang tidak tercemar dapat menghilangkan pengaruh senyawa hidrokarbon dari limbah minyak tersebut.

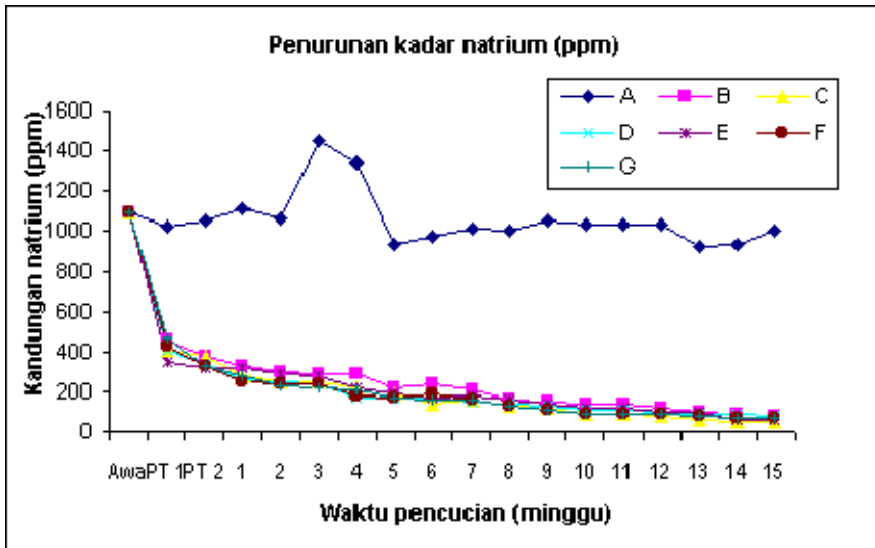
Lahan sawah yang tercemar limbah industri tekstil menyebabkan kerusakan tanaman padi, dan gagal panen terutama pada musim kemarau, seperti yang terjadi pada lahan persawahan di Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung. Penelitian di rumah kaca yang menggunakan tanah dari lahan sawah di daerah tersebut, menunjukkan hasil gabah dari tanah yang dicuci dengan air bersih/air bebas ion meningkat 2-2,5 dibandingkan dengan hasil gabah dari tanah yang tidak dicuci (Haryono *et al.*, 2003). Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa natrium (Na) merupakan penyebab utama rusaknya tanaman padi dan menurunnya hasil gabah. Penelitian yang dilakukan Suganda *et al.* (2003) di daerah yang sama memperlihatkan kandungan Na dalam tanah sawah sangat tinggi, berkisar antara 1.300 dan 2.300 ppm.

Untuk mengatasi kandungan Na yang tinggi di dalam tanah sawah, Undang Kurnia *et al.* (2004) melakukan penelitian dengan cara *pengolahan tanah* dan *pencucian* atau *drainase*. Cara tersebut dilakukan berdasarkan prinsip bahwa bila garam dilarutkan dengan air bersih akan berkurang konsentrasinya. Air bersih dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti sumur dalam dan sungai yang masih bersih atau tidak tercemar. Pengolahan tanah dimaksudkan untuk mengaduk-aduk garam yang terakumulasi di dalam tanah atau lumpur yang ada di lapisan olah agar larut pada saat pencucian. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pengolahan tanah dan pencucian mampu menurunkan konsentrasi Na dalam air drainase (Gambar 2). Kandungan Na berkurang dari 1.100 ppm menjadi 450 ppm setelah pengolahan tanah pertama (PT 1), dan menjadi 300 ppm setelah pengolahan tanah kedua (PT 2). Selama pertumbuhan tanaman, konsentrasi Na dalam air drainase berkurang dari 300 ppm pada satu minggu setelah tanam menjadi 60 ppm pada minggu ke-15. Akan tetapi, cara pengolahan tanah, baik pengolahan tanah biasa maupun pengolahan tanah dalam, dan selang waktu pencucian atau drainase setiap 1, 2, dan 3 minggu tidak secara nyata menurunkan konsentrasi Na dalam air drainase. Namun demikian, pengolahan tanah biasa dan pencucian setiap 3 minggu merupakan pilihan yang baik, karena perlakuan tersebut paling efisien dan pengaruhnya sama baik dengan perlakuan lainnya. Hasil penelitian juga memperlihatkan bahwa pertumbuhan tanaman sangat baik dan hasil gabah meningkat mencapai 8-10 t ha⁻¹ (Tabel 17). Agaknya setelah tanah mengalami pencucian, tanaman padi menunjukkan pertumbuhan yang normal seperti sebelum terjadi pencemaran.

Penanggulangan secara kimia

Pengendalian pencemaran lahan sawah, terutama yang disebabkan oleh limbah industri dan penggunaan bahan agrokimia secara kimia relatif lebih mahal dibandingkan dengan penanggulangan secara fisik. Sama halnya dengan penanggulangan secara fisik, tujuan penanggulangan secara kimia adalah untuk mengurangi atau meminimalkan dampak yang timbul akibat pencemaran, karena

untuk meniadakan sama sekali dampak pencemaran sangatlah sulit.



Gambar 2. Konsentrasi Na dalam air drainase akibat pengolahan tanah dan pencucian

- A: Kontrol
- B: Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 1 minggu
- C: Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 2 minggu
- D: Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 3 minggu
- E: Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 1 minggu
- F: Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 2 minggu
- G: Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 3 minggu

Tabel 17. Pengaruh pengolahan tanah dan pencucian/drainase sampai 15 minggu setelah tanam terhadap pertumbuhan tanaman dan hasil gabah di lahan sawah yang tercemar limbah industri tekstil di Rancaekek, Kabupaten Bandung

Perlakuan	Tinggi tanaman	Jumlah anakan	Hasil gabah
Kontrol	41 cm	23 batang	1,8 t ha ⁻¹
Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 1 minggu	94	37	9,7
Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 2 minggu	95	34	8,9
Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 3 minggu	90	37	10,5

Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 1 minggu	95	38	10,5
Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 2 minggu	94	37	9,3
Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 3 minggu	94	36	8,5

Sumber: Undang Kurnia et al. (2004).

Bahan-bahan alami seperti pupuk anorganik dan organik, pupuk kandang, dan kapur dapat digunakan dalam memperbaiki kualitas tanah sawah yang mengalami pencemaran. Meskipun tidak sepenuhnya dilakukan secara kimia, Nurjaya (2003) melakukan penelitian di rumah kaca menggunakan zeolit, pupuk kandang, abu sekam, dan karbon untuk menyerap Pb dan Cd dari tanah sawah dari Kabupaten Tegal, Jawa Tengah, yang ditanami bawang merah. Hasilnya menunjukkan, abu sekam mampu menyerap Pb dan Cd lebih banyak dibandingkan dengan amelioran lainnya, baik oleh daun maupun umbi (Tabel 18).

Tabel 18. Serapan Pb dan Cd oleh daun dan umbi bawang merah akibat ameliorasi pada tanah Inceptisols Tegal tercemar pestisida, pada penelitian di rumah kaca

Perlakuan dan takaran	Serapan Pb		Serapan Cd	
	Daun	Umbi	Daun	Umbi
	mg pot ⁻¹			
Kontrol	0,0093	0,0110	0,0008	0,00077
Zeolit (5 t ha ⁻¹)	0,0070	0,0102	0,0006	0,00053
Pupuk kandang (5 t ha ⁻¹)	0,0094	0,0095	0,0006	0,00052
Abu sekam (10 t ha ⁻¹)	0,0136	0,0134	0,0007	0,00063
Karbon (5 t ha ⁻¹)	0,0095	0,0104	0,0007	0,00067

Sumber: Nurjaya (2003).

Pengendalian secara biologi

Untuk menanggulangi pencemaran lahan sawah secara biologi dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis vegetasi atau tanaman yang ditanam pada tanah yang tercemar. Cara tersebut disebut fitoremediasi (*phytoremediation*), yang diharapkan mampu mengurangi atau menyerap logam berat dan B₃ dari dalam tanah. Selain itu, cara lain untuk mengurangi dampak negatif logam berat dan B₃ pada tanah sawah yang tercemar limbah industri adalah dengan penerapan teknologi bioremediasi (*bioremediation*).

Fitoremediasi

Di Jepang, Noriharu dan Tomohito (2002) menggunakan tanaman padi untuk remediasi tanah yang tercemar logam berat, sedangkan Katayama (2002) menemukan bahwa berbagai jenis tanaman yang tumbuh di lahan kering dan

dalam kondisi anaerob/jenuh air atau tergenang, seperti dari famili *Cyperaceae* mampu memperbaiki kualitas tanah dan air tercemar logam berat dan B₃. Untuk kondisi Indonesia, jenis-jenis tanaman yang tumbuh dalam kondisi tergenang seperti mendong (*Fimbristylis globulosa*), eceng gondok (*Eichornia crassipes*), rumput-rumputan di tanah sawah, padi sawah, serta tanaman air lainnya mempunyai kemampuan yang baik dalam menyerap logam berat dan B₃ dari dalam tanah. Gambar 3 memperlihatkan tanaman mendong (*Fimbristylis globulosa*) yang tumbuh pada tanah sawah tercemar limbah industri tekstil.

Penelitian Undang Kurnia *et al.* (2004) pada lahan sawah yang tercemar limbah industri tekstil di Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung, membuktikan bahwa mendong dan eceng gondok yang ditanam pada tanah sawah mampu menyerap logam berat (Tabel 19). Namun, kandungan beberapa unsur logam berat seperti Ni, Cr, Mn, dan Zn dalam tanah sawah mengalami peningkatan setelah 100 hari sejak penanaman. Hal tersebut diduga karena di dalam tanah sawah sering mengalami perubahan kondisi reduksi dan oksidasi, terutama pada saat pengolahan tanah, dan satu atau dua minggu menjelang panen, menyebabkan logam tersebut lebih banyak terbentuk di dalam tanah. Selain itu secara alami, unsur-unsur Mn, Zn, dan Fe yang ada di dalam tanah sawah sering dijumpai dalam konsentrasi tinggi tergantung bahan induk dan kondisi tanah. Dalam konsentrasi yang berlebihan dan dalam bentuk senyawa atau ion tertentu (tergantung kondisi tanah), logam berat tersebut dapat berpengaruh buruk terhadap pertumbuhan tanaman padi. Hasil penelitian tersebut juga membuktikan, bahwa logam berat terkonsentrasi lebih banyak pada akar dibandingkan dengan bagian batang atau daun tanaman, walaupun perbedaan tersebut tidak nyata (Tabel 19).



Gambar 3. Tanaman mendong (*Fimbristylis globulosa*) berumur 3 minggu pada tanah sawah yang tercemar limbah industri tekstil di lahan persawahan Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung.

Bioremediasi

Bioremediasi adalah pemanfaatan mikroba sebagai perantara dalam reaksi kimia dan proses fisik secara metabolik di atas permukaan tanah (*ex situ*) dan di dalam tanah (*in situ*). Proses perbaikan kualitas lingkungan dari kontaminasi bahan-bahan kimia secara biologi dapat mengubah senyawa kimia kompleks atau sederhana menjadi bentuk yang tidak berbahaya (Skladany and Metting, 1993).

Salah satu teknologi untuk merehabilitasi tanah yang tercemar limbah adalah dengan memanfaatkan mikroorganisme, dikenal sebagai bioremediasi. Mikroorganisme merupakan bioremediator ampuh untuk memindahkan atau menghilangkan logam-logam melalui mekanisme serapan secara aktif atau pasif (Volesky and Holand, 1995). Proses-proses terjadi melalui beberapa mekanisme, yaitu adsorpsi, reaksi reduksi dan oksidasi, serta metilasi (Hughes and Rolle, 1989). Menurut Sims *et al.* (1990), keberhasilan penanganan biologis terhadap kontaminan dalam media tanah ditentukan oleh empat faktor utama, yaitu: (1) heterogenitas limbah; (2) konsentrasi zat atau senyawa; (3) toksisitas dan anti degradasi; dan (4) kondisi yang sesuai untuk pertumbuhan mikroba.

Tabel 19. Konsentrasi logam berat di dalam tanah, akar dan batang berbagai jenis tanaman pada lahan sawah tercemar limbah industri tekstil di Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung

Perlakuan	ppm
Tanah awal	
Mending	
▪ tanah	
▪ akar	
▪ batang	
Eceng gondok	
▪ tanah	
▪ akar	
▪ batang	
Kontrol/umput	
▪ tanah	
▪ akar	
▪ daun	

Sumber: Undang Kurnia *et al.* (2004).

Catatan: 1. Kadar logam berat pada perlakuan mendong, eceng gondok, dan kontrol (rumput alami), baik di dalam tanah, akar, maupun batang adalah hasil pengamatan 100 hari sejak awal penanaman.

2. Perlakuan kontrol/rumput, adalah petak sawah yang tidak ditanami, namun selama penelitian ditumbuhi rumput-rumputan alami, sehingga rumput tersebut turut dipanen dan dianalisis.

Teknologi bioremediasi dapat dilakukan secara *in situ* dan *ex situ*. Proses *in situ* dilakukan pada habitat atau lingkungan tempat asal, biasanya membutuhkan penyediaan oksigen dan nutrisi (*nutrient*). Proses *ex situ* dilakukan dengan memindahkan senyawa pencemar dari habitat asalnya, biasanya dengan penggalan ke suatu lingkungan buatan (Jakpa *et al.*, 1998).

Teknologi bioremediasi *ex situ* meliputi tiga cara:

- (1) *Landfarming* (berkaitan dengan aerasi, pencampuran tanah yang tercemar, penambahan nutrisi untuk mikroorganisme, dan pengontrolan tingkat kelembapan tanah dengan cara penambahan air secara periodik)
- (2) Pengomposan (senyawa pencemar dicampur dengan zat yang berisi senyawa organik, seperti pupuk, kemudian dimasukkan ke dalam suatu tempat khusus)
- (3) Bioreaktor (model operasi terhadap tanah yang tercemar yang dilakukan dalam sebuah tempat yang berisi cukup air untuk menjaga agar proses pencampuran tetap berlangsung).

Proses biodegradasi suatu senyawa pencemar tergantung jenis mikroorganismenya (Lemigas, 1995). Menurut Veen *et al.*, (1997). Ada dua kelompok bakteri berdasarkan kemampuannya dalam merombak senyawa-senyawa toksik, yaitu:

- (1) Kelompok metabolit. Bakteri tersebut mampu tumbuh dan memperbanyak diri dengan menggunakan senyawa toksik sebagai makanannya, misalnya bakteri *Pseudomonas* dengan mekanisme oksidoreduksi. Pertukaran elektron yang dimulai dengan reaksi memakai O₂ atau dengan hidrolisis, penambahan gugus OH menghasilkan enzim yang dapat digunakan oleh bakteri tersebut untuk mengasimilasi hidrokarbon dari molekul aromatik yang umumnya toksik, seperti benzena, toluena, dan zylene.
- (2) Kelompok ko-metabolit. Bakteri tersebut mampu tumbuh dan memperbanyak diri dengan sumber makanan biasa seperti glukosa dan amonia, serta mampu mentransformasikan senyawa toksik menjadi tidak toksik dengan cara mensekresi enzim yang merombak senyawa tersebut sebagai usaha untuk mempertahankan diri.
- (3) Pada limbah industri, pertambangan, bahan bakar dan tanah tercemar logam berat terdapat banyak bakteri, fungi, alga, dan ragi (*yeast*) yang mampu mengakumulasi logam berat Ag, Au, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, U, Zn (Gadd and White, 1993).

Beberapa jenis bakteri, seperti *Pseudomonas*, *Thiobacillus*, *Bacillus*, dan bakteri penambat N dilaporkan mampu mengakumulasi logam berat (Meeting and Skladany, 1993). Mikroorganisme mempunyai berbagai macam cara dalam menyerap logam toksik dan beberapa mekanisme telah diketahui pada tingkat molekuler. Resistensi logam biasanya disandi oleh plasmid yang terdapat dalam

bakteri. Plasmid yang menyandi *efflux pathway* untuk As dan Cd terdapat pada beberapa bakteri tertentu dan dapat membedakan jalur penyerapan untuk P dan Mn, melalui As dan Cd masing-masing masuk ke dalam sel. Beberapa logam dan komponennya merupakan sasaran dalam biotransformasi yang dapat meningkatkan atau menurunkan toksik. Jalur *efflux* untuk logam seperti Cd dan ion Hg^{2+} didetoksifikasi melalui translokasi logam yang masuk melalui intraseluler reduktase. Proses alkilasi dari komponen Pb dan As oleh mikroba prokariotik dan eukariotik dapat meningkatkan potensi toksik.

Mikroorganisme mengembangkan berbagai mekanisme resistensi dalam menetralkan atau meniadakan sifat toksik logam berat. Mekanisme resistensi atau toleransi terhadap logam berat melalui pengikatan logam berat pada permukaan sel. Pada *E coli* dan sebagian besar bakteri Gram negatif memiliki kapasitas muatan yang lebih rendah dari pada Gram positif, tetapi memiliki struktur kompleks tiga lapis (inter membran, peptidoglikan dan membran sitoplasma) yang mampu mengikat dan mengimobilisasi ion logam termasuk Pb^{2+} dan Hg^{2+} . Bakteri Gram negatif umumnya menunjukkan toleransi terhadap logam yang lebih besar daripada Gram positif. Interaksi logam dengan bagian dalam sel (intraseluler) diawali pengikatan logam yang berlangsung cepat dan reversibel pada permukaan sel, meminimalkan akumulasi logam oleh sel, mentransformasikan bentuk toksik menjadi bentuk lain (biasanya bentuk volatil), mengikat logam menjadi bentuk tidak toksik dan mencegah logam masuk ke dalam sel. Logam ditransport ke dalam sel melalui membran ke arah berlawanan atau ke luar sel (*efflux*) diikuti akumulasi logam dalam kompartemen sel. Situs pengikat potensial pada sel mikroba, matriks ekstraseluler, serta komponen struktural pada bakteri, alga dan fungi meliputi peptidoglikan, asam teikuronat (komponen struktur dinding sel bakteri), polisakarida, selulosa, asam uronat, protein, glukosa dan komponen dinding sel cendawan (glukan, mannan, chifuri, dan melanin), dengan tingkat spesifikasi ligan yang sesuai. Terikatnya logam pada dinding sel bakteri disebabkan banyak situs anionik pada dinding sel, terutama (1) gugus fosfodiester dari asam-asam tekoat; (2) gugus karboksil bebas pada peptidoglikan; (3) gugus karboksil dari polimer dinding sel; dan (4) gugus amida dari rantai peptida. Peptidoglikan paling nyata mengikat ion logam dan membentuk situs-situs nukleasi untuk deposisi sekunder (Hughes dan Rolle, 1989). Lapisan peptidoglikan resisten terhadap degradasi apabila konstituen outolisin (enzim degradatif) terdenaturasi, sehingga peptidoglikan dapat persisten lama pada lingkungan, walaupun sel telah mati (Sadhukhan *et al.*, 1997). Ligan mengikat logam secara selektif, berdasarkan prinsip dasar kimia. Faktor yang menentukan ukuran interaksi logam dengan ligan adalah kekuatan polarisasi dan karakter kation, keduanya merupakan faktor spesifik sebagai pengaruh pengkelatan dan pengaruh sinergis. Situs aktif enzim dapat mengikat logam sekitarnya, seperti halnya katalisis enzim yang membutuhkan bentuk geometri tertentu. Transisi ion logam penting digunakan untuk katalisis redoks, dapat menghasilkan nilai redoks yang tepat. Logam ini mengikat gugus-SH enzim dan mengadakan perubahan terhadap struktur tersier dan kuartir protein, juga gugus merkaptio fungsional ko-enzim A yang diinhibisi (Hughes and Rolle, 1989). Pembentukan kompleks logam secara

intraseluler pada beberapa jenis mikroorganisme logam dilakukan secara inducibel, dengan membentuk atau mensintesis metalothionein atau protein berbobot molekul rendah dan kaya asam amino yang mengikat Cd, Zn, dan Cu. Plete (1989) menggambarkan interaksi antara ion Cd dengan bakteri Gram positif, selama ion logam terikat oleh gugus reaktif polimer dinding sel tidak akan memberikan pengaruh penting pada bakteri. Apabila ion logam menempel pada membran sitoplasma, ion logam akan bereaksi dengan gugus fungsi pada membran dan selanjutnya logam ditransport ke dalam sel. Pengambilan logam Cd ini bisa secara pasif, yaitu difusi melalui pori-pori membran atau secara aktif, yaitu dengan mekanisme pembawa (*carrier*) yang tergantung energi. Peristiwa penyerapan logam tersebut menyebabkan konsentrasi internal ion logam mencapai taraf toksik dan mengakibatkan tidak berfungsinya metabolisme sel. Namun konsentrasi ion logam bebas dalam sitoplasma kemungkinan direduksi melalui pembentukan kompleks logam dengan ligan anorganik atau organik (fosfat, sulfat, dan protein).

Pembentukan kompleks suatu logam dengan lapisan terluar pada dinding sel mikrob terutama dengan polimer ekstraseluler dan perifer, seperti pada galur-galur *Zooglea ramigera* menghasilkan matriks bergelatin yang mampu mengikat logam. Bakteri yang menghasilkan kapsul ini memiliki 25% bobot logam setelah tumbuh di limbah. Studi lain mengindikasikan bahwa lebih dari 3 mmol Cu g⁻¹ bobot kering dapat diakumulasi oleh sel bakteri ini (Hughes dan Rolle, 1989). *Klebsiella aerogenes* menghasilkan kapsul polisakarida yang berperan sebagai pengikat Cu di luar sel (Cha and Cooksey, 1991). *Neurospora crassa* mampu mengikat logam Co, Fe dan Zn yang disebabkan chitin dan chitosan, sedangkan yang mengikat Cu²⁺ dan Cd²⁺ dengan kuat pada cendawan *Aureobasidium pulullan* adalah melanin. Secara normal pengikatan logam pada permukaan sel mikroba dianggap sebagai awal dari proses transport logam ke dalam sel. Tetapi apabila mekanisme akumulasi transmembran tidak ada, maka pengikatan logam pada dinding sel akan persisten (Hughes dan Rolle, 1989). Proses akumulasi logam berat oleh bakteri sifatnya stabil, pengikatan terjadi pada muatan negatif bakteri terhadap muatan positif logam berat.

Di Indonesia, penggunaan bioremediator bakteri pengakumulasi logam berat, *Bacillus* sp. telah diujikan pada tanah sawah tercemar limbah industri. Hasil pengujian pada tanah di Desa Sukajadi, Kecamatan Sukatani, Kabupaten Bekasi (0,30 ppm Cd), inokulasi *Bacillus* sp. menurunkan dengan nyata serapan Pb dan Cd pada beras (Tabel 20). Serapan Pb menurun dari 36,49% hingga 58,21%, serapan Cd menurun dari 31,05% hingga 51,32%. Demikian pula serapan Cd oleh jerami 43%, dan kombinasi bioremediator logam berat *Bacillus* sp. dan *biofertilizer* BioPhos mampu menurunkan serapan Cd beras 49%, dan kadar Cd tanah 36%. Di Desa. Balong Ampel, Kecamatan Sukarahayu, Kabupaten Bekasi (0,38 ppm), aplikasi kombinasi bioremediator *Bacillus* sp. dan Zn meningkatkan kualitas beras dengan menurunnya kandungan Cd dalam beras dari 1,5 g ha⁻¹ menjadi 1,2 g ha⁻¹, dan produksi beras dari 3,1 t ha⁻¹ menjadi 4,4 t ha⁻¹ (Tabel 21).

Tabel 20. Jumlah malai, jumlah gabah per malai, persentase gabah isi, bobot kering gabah dan bobot 1.000 butir gabah yang ditanam di sawah tercemar logam berat limbah industri, di Desa Sukajadi, Kecamatan Sukatani, Kabupaten Bekasi

Perlakuan	Jumlah malai	Jumlah gabah per malai	Persen gabah isi	Bobot gabah kering	Bobot 1000 butir	Hasil gabah	Hasil beras	Serapan Pb	Serapan Cd
			%	5 kg 5m ²	g	t ha ⁻¹	g ha ⁻¹		
1	18,60ab*	126,49ab	86,61ab	2,34ab	27,92ab	4,68ab	3,68ab	3,068a	0,728a
2	19,17a	107,49b	89,10a	2,33b	28,00a	4,67b	3,67b	1,824b	0,453b
3	18,90a	125,33b	90,07a	1,96b	27,60b	4,19b	3,58b	1,598b	0,465b
4	19,52a	107,54b	87,61a	2,23b	27,97a	4,64b	3,67b	2,233b	0,457b

* Angka dalam kolom yang sama yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf nyata 5% menurut uji jarak ganda Duncan.
Perlakuan: 1: Kontrol (hanya medium. tanpa inokulasi mikroba); 2: PG 65-06; 3: MT 77-08; 4: MRI 12-05.

Tabel 21. Rata-rata jumlah malai, bobot jerami, bobot gabah isi, bobot beras per rumpun di tanah sawah tercemar logam berat industri, di Desa Sukarahayu, Kecamatan Tembelang, Kabupaten Bekasi yang diinokulasi *Bacillus* sp. pada saat panen (MT 2002)

P	Jumlah malai per rumpun	Bobot jerami	Bobot gabah isi	Bobot beras	Serapan Cd beras	Serapan Zn beras
1		4.686d	4.02	3.13		93,3

	44,50cd*		9e	0d	1,52 1cd	e
2	49,50ab cd	6.027a bc	4.51 2de	3.48 2cd	1,69 2bc	95,3 de
3	52,75ab cd	6.375a bc	5.43 3abc	4.39 9ab	1,22 3d	129, 0bc
4	44,00d	5.825b c	4.95 4cd	3.95 4bc	1,30 5de	115, 8bcd
5	59,25a	7.064a	5.13 3bcd	4.26 2b	1,18 5ef	135, 00a b
6	56,75ab	6.910a b	5.84 5ab	4.58 3ab	0,95 3f	114, 0bcd e

* Angka dalam kolom yang sama yang diikuti huruf sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji jarak ganda Duncan.
Perlakuan: 1. kontrol (tanpa inokulasi mikroba); 2. formula A (terdiri atas PB 138,ab PG 65-06, MT 77-08 dan MR I-053); formula A: (terdiri atas PB 138, PG 65-06, MT 77-08 dan MRI-05) + Zn 7.5 g.petak⁻¹; 4. Kompos (jerami padi 4,5 kg.petak⁻¹); 5. Kompos (jerami padi 4,5 kg.petak⁻¹) + Zn 7,5 g.petak⁻¹; 6. BioPhos (10 g.l⁻¹ aquades). *Bacillus* sp. yang hidup dan menempel pada permukaan akar tanaman padi pada saat penanaman 2,14 x 10⁹ sel ml⁻¹ dan formula B ialah 6,9 x 10⁹ sel ml⁻¹.

Keberhasilan reduksi pencemaran logam berat oleh mikroba pengakumulasi logam berat dipengaruhi oleh keunggulannya dalam mengakumulasi logam berat. Setiap jenis mikroba mempunyai karakter yang berbeda untuk dapat hidup pada lingkungan yang sama. Mikroorganisme yang mampu hidup pada konsentrasi logam yang lebih tinggi dari nilai baku mutu lingkungan yang telah ditetapkan, dapat dijadikan rujukan dalam menggunakan mikroba tersebut dalam mereduksi pencemaran, baik di tanah pertanian maupun di badan perairan, sesuai dengan tingginya kandungan logam berat dalam lingkungan yang tercemar. Pemanfaatan mikroba tersebut diharapkan dapat meningkatkan kesehatan petani dan keuntungan usaha tani, sehingga mampu mempercepat pengentasan kemiskinan. Pemanfaatan mikroba pengakumulasi logam berat tidak menimbulkan pencemaran tanah.

PENUTUP

Pengendalian pencemaran lingkungan pertanian, khususnya pencemaran pada lahan sawah ditujukan untuk (1) pengendalian sumber dan penyebab pencemaran dan (2) pengendalian dampak yang terjadi pada lahan sawah, tanah, air, dan tanaman atau produk yang dihasilkan. Pengendalian sumber dan penyebab pencemaran lebih ditujukan bagi para pelaku pencemaran, dalam hal ini di antaranya adalah industri, baik industri pertanian maupun non pertanian, kegiatan pertambangan baik legal maupun ilegal. Upaya pengendalian sumber dan penyebab pencemaran dapat dilakukan dengan penataan kembali keberadaan atau kelayakan sumber pencemar melalui penegakan peraturan dan perundang-undangan serta pengawasan yang ketat tentang kewajiban pelaku industri mengoptimalkan fungsi instalasi pengolahan air limbah (IPAL), dan optimalisasi fungsi pengawasan dan pengendalian oleh Badan Pengendali Dampak Lingkungan (Bappedal).

Pengendalian dampak pencemaran pada lahan sawah difokuskan pada upaya penanggulangan objek yang terkena dampak, dalam hal ini adalah lahan sawah (tanah, air, tanaman dan hasil atau produk pertanian). Fokus utama pengendalian pencemaran lahan sawah adalah menyehatkan atau memperbaiki kualitas lahan yang sudah tercemar, yang meliputi kualitas biofisik, sifat-sifat kimia dan kesuburan tanah termasuk aktivitas makro/mikro fauna tanah. Tolok ukur atau indikator keberhasilan penyehatan atau perbaikan kualitas lahan mengacu pada batas kritis atau ambang batas unsur-unsur yang merugikan tanah, air, dan tanaman seperti bahan beracun berbahaya (B_3) dan logam berat. Oleh sebab itu, batas kritis atau ambang batas logam berat dan B_3 dalam tanah harus dijadikan acuan untuk melakukan tindakan hukum bagi pelaku pencemaran dan kerusakan lingkungan. Namun, batas kritis atau ambang batas B_3 dan logam berat dalam tanah belum ada. Untuk sementara dapat digunakan ambang batas B_3 dan logam

berat yang dipunyai oleh beberapa negara di luar negeri, dan sudah saatnya penetapan nilai ambang batas B₃ dan logam berat dalam tanah di Indonesia segera diwujudkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B. J. 1990. Soil processes and behaviour of metal. p. 100-121. *In* Heavy Metals in Soils. 2nd ed. Blackie Glasgow, and London Halstead Press. John Wiley and Sons Inc. New York.
- Anonim. 1977. The Condensed Chemical Dictionary. Van Nostrand Reinhold Company. New York.
- Ardiwinata, A. N., S. Y. Jatmiko, dan E. S. Harsanti. 1999. Monitoring residu insektisida di Jawa Barat. hlm. 91-105 *dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah Menuju Sistem Produksi Padi Berwawasan Lingkungan. Bogor, 24 April 1999. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor.
- B.P. Bimas. 1990. Pesticide Use in Planning and Realization for Food Crops. Ministry of Agriculture. Jakarta. 13 p.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 1992. 5 Tahun Penelitian dan Pengembangan Pertanian (1987-1991). Sumbangan dalam Menyongsong Era Tenggul Landas. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian R.I. Jakarta.
- Cha J-S. and D. A. Cooksey. 1991. Copper resistance in *Pseudomonas syringae* mediated by periplasmic and outer membrane proteins. *Proc Natl Acad Sci USA* 88: 8.915-8.919.
- Davies, B. E. 1990. Lead. p. 177-196. *In* Heavy Metal in Soils. Blackie Glasgow and London Halsted Press John Willey and Sons Inc. New York.
- Direktorat Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan. 1989. Lampiran Surat Keputusan Direktur Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan No. 03725/B/SK/VII/89 tentang Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Makanan.
- Doelman, P. 1986. Resistance of soil microbial communities to heavy metals. p. 369-398. *In* FEMS Symposium No. 33. Microbial Communities in Soil. Copenhagen, August 4-8, 1985. Elsevier Applied Science Publisher Ltd. London, U.K.
- Endrawanto dan H. Winarno. 1996. Proses pengolahan limbah secara fisika dan kimia. hlm. *dalam* Prosiding Pelatihan dan Lokakarya Peranan

- Bioremediasi dalam Pengelolaan Lingkungan. LIPI-BPPT-HSF.
- Gadd, G.M., and C. White. 1993. Microbial treatment of metal pollution-working biotechnology. *Trends in Biotechnology* 3 (2): 353-359.
- Harsanti, E. S., S. Y. Jatmiko, dan A. N. Ardiwinata. 1999. Residu insektisida pada ekosistem lahan sawah irigasi di Jawa Timur. hlm. 119-128 *dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah Menuju Sistem Produksi Padi Berwawasan Lingkungan. Bogor, 24 April 1999. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor.
- Haryono, S. Sutono, U. Kurnia, dan A. Abdurachman. 2003. Pengaruh pemberian bahan organik dan pencucian terhadap hasil padi pada tanah tercemar industri tekstil di rumah kaca. hlm. 231-243 *dalam* Prosiding Seminar Nasional. Peningkatan Kualitas Lingkungan dan Produk Pertanian. Pertanian Produktif Ramah Lingkungan Mendukung Ketahanan dan Keamanan Pangan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Hughes, M. N., and K.E. Rolle. 1989. *Metals and Microorganism*. Elsevier Publishing Company. 188 p.
- Jakpa, T., A. Ladolo, and S. Miertus, 1998. On overview of soil remediation technologist. *Gen Engineer and Biotec* 3 and 4.
- Jatmiko, S. Y., E. S. Harsanti, dan A. N. Ardiwinata. 1999. Pencemaran pestisida pada agroekosistem lahan sawah irigasi dan tadah hujan di Jawa Tengah. hlm. 106-118 *dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah Menuju Sistem Produksi Padi Berwawasan Lingkungan. Bogor, 24 April 1999. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor.
- Katayama, J. 2002. Purification of water by Papyrus and other aquatic plants. *Farming Japan* 36-6: 28-35. (Special Issue: Environment-Purifying Plants).
- Lemigas. 1995. Karakteristik beberapa mikroba lapangan minyak Indonesia dalam prospek MEOR. hlm. 34-40 *dalam* Kumpulan Makalah Simposium RI, Jakarta. (Tidak dipublikasikan)
- Meeting, F.B.J, and G.J. Skladany. 1993. Bioremediation of contaminated soil. *In* F.B. Meeting (*Ed*). *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management*, Marcel Dekker. Inc. New York.
- Ministry of State for Population and Environment Republic of Indonesia and Dalhousie University Canada. 1992. *Environmental Management in Indonesia. Report on Soil Quality Standards for Indonesia (interim report)*.

- Nasoetion, I., dan R. Sismiyati. 1996. Identifikasi dan Teknik Penanggulangan Logam Berat pada Lahan Tanaman Pangan. Laporan Hasil Penelitian Balitbio Bogor. 26 hlm.
- Noriharu, A. E., and A. Tomohito. 2002. Utilization of rice plants for phytoremediation in heavy metal polluted soils. *Farming Japan* 36 (6): 16-21 (Special Issue).
- Nurjaya. 2003. Identifikasi Status dan Sebaran Logam Berat Pb dan Cd di Sentra Bawang Merah Kabupaten Tegal dan Brebes (mimeo).
- Palar, H. 1994. Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat. Penerbit Rineka Cipta.
- Pemerintah Republik Indonesia. 1990. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 20 tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air. Lampiran Daftar Kualitas Air Golongan C.
- Piotrowski, J. K., and D. O. Coleman. 1980. Environmental Hazard of Heavy Metal: Summary Evaluation of Lead, Cadmium, and Mercury. WHO Geneva.
- Plette, A. C. C. 1996. Cadmium and Zinc Interaction with a Soil Bacterium, from Variabel Charging Behavior of The Cell Wall to Bioavailability in Soil. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. ISBN 90-5485-524-X; 159p.
- PT Sawindo Kencana. 2002. Penelitian Land Aplikasi Limbah Kelapa Sawit. Kerangka Acuan. PT Sawindo Kencana (mimeo).
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 2000. Pengkajian Baku Mutu Tanah pada Lahan Pertanian. Laporan Akhir Kerjasama Antara Proyek Pengembangan Penataan Lingkungan Hidup Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Jakarta dan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat-Badan Litbang Pertanian. No. 50/Puslittanak/2000. (Tidak dipublikasikan)
- Ramadhi, T. 2002. Identifikasi Pencemaran Lahan Sawah Akibat Limbah Industri Tekstil. (Studi kasus di kecamatan Rancaekek, kabupaten Bandung). Laporan Praktek Lapang. Program Studi Analisis Lingkungan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, IPB. Bogor. (Tidak dipublikasikan)
- Sadhukhan, P. C., S. Ghosh, J. Chaundhari, D. K. Ghosh, and A. Mandal. 1997. Mercury and organomercurial resistance in bacteria isolated from freshwater fish of wetland fisheries around Calcutta. *Environ Pollut* 97(1): 71-78.
- Saraswati, R., D. A Santosa, dan I. Nasution. 2003. Reduksi Pencemaran Lahan Pertanian oleh Senyawa Logam Berat dengan Teknologi Bioremediasi. Laporan Akhir Riset Unggulan Terpadu VIII. Kantor Menteri Negara Riset dan Teknologi.

- Setyorini, D., Soeparto, dan Sulaeman. 2003. Kadar logam berat dalam pupuk. hlm. 219-229 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Kualitas Lingkungan dan Produk Pertanian: Pertanian Produktif Ramah Lingkungan Mendukung Ketahanan dan Keamanan Pangan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Sims, J.L., R. C. Sims, and J. E. Matthews. 1990. Approach to bioremediation of contaminated soil hazard. *Waste Hazard Mater* 7: 117-149.
- Sismiyati, R., L. Sukarno, dan A. K. Makarim. 1993. Masalah pencemaran Cadmium pada padi sawah. hlm. 477-493 *dalam* Kinerja Penelitian Tanaman Pangan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Jakarta.
- SK Bersama Menteri Pertanian dan Menteri Kesehatan. 1996. Batas Maksimum Residu Pestisida pada Hasil Pertanian. 37 hlm.
- Skladany, G. J., and F. B. Metting. 1993. Bioremediation of contaminated soil. p. 483-513. *In* Metting, F.B. (Ed). *Soil Microbial Ecology. Application in Agriculture and Environmental Management*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Soejitno, J., dan A. N. Ardiwinata. 1999. Residu pestisida pada agroekosistem tanaman pangan. *dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi GRK dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah. Menuju Sistem Produksi Padi Berwawasan Lingkungan, Bogor.
- Soejitno, J., dan A. N. Ardiwinata. 2002. Penggunaan pestisida secara selektif dan ramah lingkungan. Prosiding Seminar Nasional. Membangun Sistem Produksi Tanaman Pangan Berwawasan Lingkungan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta.
- Soemarwoto, O. 1991. Indonesia dalam Kancah Isu Lingkungan Global. Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Suganda, H., D. Setyorini, H.. Kusnadi, I. Saripin, dan Undang Kurnia. 2003. Evaluasi pencemaran limbah industri untuk kelestarian sumberdaya lahan sawah. hlm. 203-221 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian. Bogor 2 Oktober dan Jakarta, 25 Oktober 2002. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Suharsih, P. Setyanto, dan Titi Sopiawati. 2000. Pengaruh penggunaan pupuk N lambat urai terhadap emisi gas N₂O pada lahan sawah tadah hujan. hlm. 67-72 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Budidaya Tanaman Pangan Berwawasan Lingkungan. Puslitbang Tanaman Pangan, Badan Litbang Pertanian.

- Sukmana, S., J. Prawirasumantri, M. Sodik, dan M. Rustandi. 1986. Laporan Penelitian Mengatasi Keracunan Limbah Pengeboran Minyak. Pusat Penelitian Tanah-Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (*mimeo*).
- Undang Kurnia, Deddy Erfandi, dan H. Kusnadi. 2004. Rehabilitasi dan reklamasi tanah sawah tercemar limbah industri tekstil di Kabupaten Bandung. Makalah disampaikan dalam Ekspose Hasil-hasil Penelitian di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bandung. Soreang, 24 Maret 2004. (Tidak dipublikasikan)
- Undang Kurnia, J. Sri Adiningsih, dan A. Abdurachman. 2003a. Strategi Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran Lingkungan Pertanian. Hal. 41-61 *dalam* Prosiding Seminar Nasional. Peningkatan Kualitas Lingkungan dan Produk Pertanian. Pertanian Produktif Ramah Lingkungan Mendukung Ketahanan dan Keamanan Pangan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Undang Kurnia, Sudirman, Haryono dan H. Kusnadi. 2003b. Penelitian pencemaran industri penyepuhan logam pada tanah sawah. Makalah disampaikan dalam Seminar Nasional Inovasi Teknologi Sumberdaya Tanah dan Iklim. Bogor, 14-15 Oktober 2003. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor. (Belum dipublikasikan)
- Undang-Undang Republik Indonesia. 1982. Ketentuan-Ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup. No.4/1982.
- Veen, J. A. V., L. S. V. Overbeek, and J. A. V. Elsas. 1997. Fate and activity microorganism introduced into soil. *Microbiology and molecular biology review* (2): 61-64.
- Volesky, B., and Z. R. Holland. 1995. *Biotechnol. Prog* 11. *In* *Biotechnology Letter*.

10. MITIGASI GAS METAN DARI LAHAN SAWAH

Prihasto Setyanto

Perubahan iklim adalah fenomena global yang dipicu oleh kegiatan manusia terutama yang berkaitan dengan penggunaan bahan bakar fosil, proses alami, dan kegiatan alih guna lahan. Proses tersebut dapat menghasilkan gas-gas yang makin lama makin banyak jumlahnya di atmosfer. Di antara gas-gas tersebut adalah karbondioksida (CO₂), metan (CH₄) dan nitrous oksida (N₂O). Gas-gas tersebut memiliki sifat seperti rumah kaca yang meneruskan radiasi gelombang pendek atau cahaya matahari, tetapi menyerap dan memantulkan radiasi gelombang-panjang yang dipancarkan bumi yang bersifat panas sehingga suhu di atmosfer bumi makin meningkat.

Dalam kurun waktu 100 tahun mendatang konsentrasi gas-gas rumah kaca tersebut diperkirakan akan meningkat dua kali lipat dibanding zaman pra industri. Pada kondisi demikian, berbagai GCM (*global circulation model*) memperkirakan peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi antara 1,7–4,5°C dalam 100 tahun mendatang. Menurut IPCC (*inter-governmental panel on climate change*), peningkatan suhu global sebesar itu akan disertai dengan kenaikan air laut setinggi 15 hingga 95 cm yang disebabkan oleh mencairnya es di kedua kutub bumi. Gupta (1997) membuat skenario dampak terhadap lingkungan di Indonesia pada tahun 2070 apabila emisi GRK tidak ditekan, yaitu: (i) kenaikan permukaan air laut 60 cm yang akan menyebabkan 3.3 juta penduduk pesisir pantai mengungsi; (ii) di sektor kesehatan, perubahan iklim global menyebabkan meningkatnya kasus malaria dari 2.075 pada tahun 1989 menjadi 3.246 pada tahun 2.070; (iii) 1.000 km jalan akan hilang beserta lima pelabuhan laut; (iv) 800,000 ha sawah akan mengalami salinasi dan produksi padi menurun 2,5%, jagung 20%, kedelai 40%. Total kerugian di bidang pertanian diperkirakan mencapai Rp 23 triliun tahun⁻¹; dan (v) 300,000 ha perikanan tepi pantai akan hilang dan 25% hutan bakau akan rusak. Semua permasalahan ini dapat menyebabkan kerugian sekitar US\$ 113 milyar.

Pemanasan global juga diperkirakan meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian iklim ekstrim. Menurut Boer (2002) apabila konsentrasi CO₂ di atmosfer meningkat dua kali lipat dari konsentrasi CO₂ saat ini, maka diperkirakan frekuensi kejadian ENSO (*El-Nino and Southern Oscillation*) akan meningkat dari sekali dalam 3-7 tahun menjadi sekali dalam 2-5 tahun. Apabila konsentrasinya meningkat tiga kali lipat, frekuensi kejadian menjadi sekali dalam 2-3 tahun. Selain itu, intensitas ENSO juga diperkirakan meningkat dua sampai tiga kali lipat.

Mitigasi emisi GRK (gas rumah kaca) adalah upaya untuk menekan laju emisi GRK dari berbagai kegiatan yang berhubungan dengan aktivitas manusia. Untuk menekan laju emisi GRK bukanlah suatu pekerjaan mudah, sebab sumber pelepasan

GRK berhubungan erat dengan berbagai sektor yang berkaitan langsung dengan kehidupan manusia seperti energi, industri, pertanian, kehutanan, dan pengelolaan limbah. Konvensi bangsa-bangsa untuk perubahan iklim UNFCCC (*United Nation Framework Convention on Climate Change*) sudah membuat komitmen untuk menekan laju emisi GRK sampai pada tingkat yang dapat mengurangi laju perubahan iklim. Protokol Kyoto adalah salah satu komitmen yang dihasilkan dalam UNFCCC. Kesepakatan yang dicapai adalah bahwa selama periode 2008-2012, negara-negara maju wajib mengurangi tingkat emisi GRK dengan rata-rata 5,2% dari emisi pada tahun 1990. Dalam implementasinya, beberapa negara maju yang sudah menandatangani protokol tersebut ternyata mengalami kesulitan, karena penekanan laju GRK akan memukul sektor industri mereka. Oleh karena itu, terbentuklah suatu pola kerjasama yang terkenal dengan istilah perdagangan karbon (*carbon trade*). Ada beberapa mekanisme perdagangan karbon yang ditawarkan dalam Protokol Kyoto. Dari beberapa mekanisme tersebut, mekanisme pembangunan bersih (*clean development mechanism, CDM*) dianggap yang paling cocok diterapkan di negara-negara berkembang, karena negara maju dapat menyerahkan komitmennya untuk menekan laju emisi di negara berkembang dengan memberikan dana kompensasi pada negara yang bersangkutan untuk setiap proyek yang dapat menekan atau menyerap emisi GRK. Indonesia sebagai negara berkembang sangat berpotensi dalam upaya menyerap emisi karbon karena luasnya lahan hutan dan pertanian.

Indonesia sebagai anggota PBB telah meratifikasi konvensi perubahan iklim melalui Undang-Undang Nomor 6 tahun 1994 dan juga telah meratifikasi Protokol Kyoto melalui Undang-Undang Nomor 17 yang dikeluarkan pada tanggal 28 Juli 2004. Dengan ikutnya Indonesia dalam konvensi perubahan iklim, maka Indonesia akan dikenakan kewajiban untuk melaporkan inventarisasi GRK dan juga dapat memanfaatkan peluang yang ditawarkan oleh konvensi, seperti dana mitigasi gas rumah kaca, dana adaptasi terhadap perubahan iklim dan lain-lain.

GAS METAN

CH₄ adalah salah satu GRK yang dihasilkan melalui dekomposisi anaerobik bahan organik. Pemasukan intensif bahan organik berupa jerami pada keadaan tergenang sangat ideal bagi berlangsungnya dekomposisi anaerobik di lahan sawah (Gambar 1). Laju produksi dan emisi CH₄ akibat proses dekomposisi bahan organik di lahan sawah dapat diukur dengan peralatan gas kromatografi dan *boks* penangkap gas yang beroperasi secara otomatis. Boks penangkap gas tersebut digambarkan pada Gambar 2. Selama periode 1998-2004, Loka Penelitian Pencemaran Lingkungan Pertanian (Lolintan) di Jakenan menginventarisasi emisi gas CH₄ di sentra-sentra produksi padi di Jawa Tengah (Tabel 1) menemukan bahwa emisi CH₄ di beberapa daerah bervariasi, tertinggi 798 kg CH₄ ha⁻¹ musim⁻¹ dan terendah 107 kg CH₄ ha musim⁻¹ (Tabel 1). Variasi emisi CH₄ tersebut tidak hanya dipengaruhi secara signifikan oleh jenis tanah, tetapi cara pengelolaan tanah dan tanaman yang kesemuanya ternyata mempunyai peran yang signifikan terhadap emisi CH₄ dari lahan sawah. Emisi CH₄ dari lahan sawah dapat ditekan. Penelitian di Jakenan menunjukkan bahwa laju produksi dan emisi CH₄ dapat ditekan antara lain melalui pemilihan varietas padi,

Gambar 2. Boks penangkap gas CH₄ dari lahan sawahTabel 1. Emisi gas CH₄ dari sentra produksi padi di Jawa Tengah

Kabupaten	Klasifikasi tanah	Varietas tanaman	Emisi CH ₄ musiman
			kg ha ⁻¹
Kebumen	Eutrudepts, Hapludalfs	IR 64	798,6
Semarang	Endoaquepts, Dystrudepts	IR 64	775,1
Boyolali	Haplustepts, Haplustalf	Memberamo	682,4
Magelang	Dystrudepts, Endoaquepts	IR 64	599,4
Sragen	Haplustepts, Dystrudepts	IR 64	543,2
Blora	Haplustepts, Haplustalf	IR 64	409,5
Kendal	Endoaquepts	IR 64	338,2
Purworejo	Eutrudepts, Undorthents	IR 64	331,1
Cilacap	Udipsamments, Endoaquents	IR 64	323,0
Pekalongan	Endoaquepts	IR 64/Way Seputih	300,5
Pati	Haplustent, Haplustalfs	IR 64	155,2
Pemalang	Hapludults	IR 64	147,6
Temanggung	Hapludults	IR 64	107,1

Sumber: Setyanto *et al.* (2004)

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI EMISI DAN MITIGASI GAS CH₄

Potensi reduksi-oksidasi tanah

CH₄ terbentuk akibat dekomposisi bahan organik pada kondisi anaerobik. Organisma yang berperan dalam proses pembentukan CH₄ ini disebut bakteri metanogenik, sedangkan bakteri yang menyebabkan berkurangnya CH₄ adalah bakteri metanotropik. Bakteri metanogenik sangat peka terhadap oksigen sedangkan metanotropik menggunakan CH₄ sebagai satu-satunya sumber energi untuk metabolisme. Mikroorganisma-mikroorganisma ini dapat berfungsi dengan maksimal sesuai perannya masing-masing tergantung dari ketersediaan oksigen dalam kondisi tanah jenuh air. Sedangkan ketersediaan oksigen tersebut dipengaruhi oleh konsentrasi oksidan-oksidan tanah seperti NO₃, SO₄, Fe₂O₃, MnO₄ dan CO₂. Salah satu faktor penting yang mempengaruhi cepat-lambatnya proses produksi dan konsumsi gas CH₄ adalah reaksi reduksi dan oksidasi (redoks) dari oksidan-oksidan tanah. Redoks potensial (Eh) merupakan petunjuk status oksidasi dan reduksi tanah. Kondisi oksidasi maupun reduksi dapat terjadi serempak dalam tanah; saat lapisan permukaan tanah berada pada kondisi oksidasi, lapisan bawah dapat berada pada kondisi reduksi akibat fluktuasi permukaan air tanah. Reduksi juga terjadi di dalam

agregat liat tanah.

Redoks potensial tanah merupakan faktor penting pengontrol pembentukan CH_4 . Tahapan proses redoks yang terjadi di lahan sawah yang tergenang adalah berkurangnya kandungan oksigen tanah, reduksi NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} dan reduksi CO_2 membentuk CH_4 (Tabel 2) Bakteri metanogenik dapat bekerja optimal pada redoks potensial kurang dari -150 mV. Proses reduksi dari oksidan-oksidan tanah ini diakibatkan oleh aktivitas mikroorganisme yang berbeda; oksigen direduksi oleh mikroorganisme anaerobik, sedangkan Mn^{4+} dan Fe^{3+} oleh bakteri fakultatif anaerobik. Urutan pemakaian elektron aseptor seperti yang disebutkan dalam Tabel 2 merupakan petunjuk kapan CH_4 dapat terbentuk dalam tanah. Semakin kaya kandungan oksidan dalam tanah, semakin lama CH_4 terbentuk dalam tanah.

Tabel 2. Urutan pemakaian elektron aseptor dalam tanah dan redoks potensial terukur dalam tanah (Ponnamperuma, 1972)

Reaksi	Redoks potensial terukur di dalam tanah (mV)
Hilangnya O_2	
$\text{O}_2 + 4 e^- + 4 \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	600 – 400
Hilangnya NO_3^-	
$\text{NO}_3^- + 2 e^- + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	500 – 200
Pembentukan Mn^{2+}	
$\text{MnO}_2 + 2 e^- + 4 \text{H}^+ \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2$	400 – 200
Pembentukan Fe^{2+}	
$\text{FeOOH} + e^- + 3 \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{H}_2$	300 – 100
Pembentukan HS^-	
$\text{SO}_4^{2-} + 9 \text{H}^+ + 6 e^- \rightarrow \text{HS}^-$	0 – -150
Pembentukan CH_4	
$(\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow n/2 \text{CO}_2 + n/2 \text{CH}_4$	-150 – -220
Pembentukan H_2	
$2 \text{H}^+ + 2 e^- \rightarrow \text{H}_2$	-150 – -220

pH tanah

Reaksi tanah yang penting adalah masam, netral dan alkalin. Hal ini didasarkan pada jumlah ion H^+ dan OH^- dalam larutan tanah. Bila dalam larutan tanah ditemukan ion H^+ lebih banyak dari OH^- maka tanah disebut masam, kondisi sebaliknya disebut alkalin. Bila konsentrasi ion H^+ dan OH^- seimbang maka disebut

netral. Untuk menyeragamkan pengertian, sifat reaksi tersebut dinilai berdasarkan konsentrasi ion H^+ dan dinyatakan dengan sebutan pH.

Sebagian besar bakteri metanogenik adalah neutrofilik, yaitu hidup pada kisaran pH antara 6-8. Wang *et al.* (1993), menemukan bahwa pembentukan CH_4 maksimum terjadi pada pH 6,9 hingga 7,1. Perubahan kecil pada pH akan menyebabkan menurunnya pembentukan CH_4 . Pada pH di bawah 5,75 atau di atas 8,75 menyebabkan pembentukan CH_4 terhambat.

Suhu tanah

Suhu tanah memegang peranan penting dalam aktivitas mikroorganisme tanah. Sebagian besar bakteri metanogenik adalah mesofilik dengan suhu optimum antara 30-40°C (Vogels *et al.*, 1988). Yamane dan Sato (1961) menemukan bahwa pembentukan CH_4 di rizosfir tertinggi dicapai pada suhu 40°C. Sedangkan menurut Holzapfel-Pschorn dan Seiler (1986) emisi CH_4 dari lahan sawah meningkat dua kali lipat bila suhu tanah meningkat dari 20°C menjadi 25°C. Hal ini dibenarkan pula oleh Schutz *et al.* (1989).

Penggenangan diam adalah lingkungan yang cocok untuk pembentukan CH_4 terutama di daerah tropis karena penggenangan diam meningkatkan suhu tanah dan suhu air di lahan sawah pada siang hari dengan kisaran 30°C hingga 40°C. Meningkatnya suhu tanah dan air disebabkan oleh efek rumah kaca di lahan tersebut di mana genangan air akan meneruskan radiasi gelombang pendek (*ultra ungu*) matahari ke tanah dan mengurangi pancaran gelombang panjang (*infra merah*) ke atas. Suhu tanah dapat meningkat hingga 40°C bila tidak ditanami. Suhu tinggi ini dapat diturunkan melalui penutupan oleh tanaman, aliran air dan hujan.

Sebagian besar *strain* bakteri metanogenik menunjukkan tingkat pembentukan CH_4 optimum pada suhu 30°C (Neue dan Scharpenseel, 1984). Ada 18 jenis bakteri metanogenik yang sudah diisolasi dari tanah, diantaranya yaitu *Methanobacterium* dan *Methanosarcina* yang umum terdapat di lahan sawah.

Varietas padi

Tanaman padi memegang peranan penting dalam emisi gas CH_4 dari lahan sawah. Diduga 90% CH_4 yang dilepas dari lahan sawah ke atmosfer dipancarkan melalui tanaman dan sisanya melalui gelembung air (*ebullition*). Ruang udara pada pembuluh aerenkima daun, batang dan akar yang berkembang dengan baik menyebabkan pertukaran gas pada tanah tergenang berlangsung cepat. Pembuluh tersebut bertindak sebagai cerobong (*chimney*) bagi pelepasan CH_4 ke atmosfer. Suplai O_2 untuk respirasi pada akar melalui pembuluh aerenkima dan demikian pula gas-gas yang dihasilkan dari dalam tanah, seperti CH_4 akan dilepaskan ke atmosfer juga melalui pembuluh yang sama untuk menjaga keseimbangan termodinamika (Raimbault *et al.*, 1977; Wagatsuma *et al.*, 1990). Mekanisme ini terjadi akibat perbedaan gradient konsentrasi antara air di sekitar akar dan ruang antar sel lisigenus pada akar dan menyebabkan CH_4 terlarut di sekitar perakaran terdifusi ke permukaan cairan akar menuju dinding sel korteks akar. Pada dinding korteks akar, CH_4 terlarut

akan berubah menjadi gas dan disalurkan ke batang melalui pembuluh aerenkima dan ruang antar sel lisigenus. Selanjutnya CH₄ akan dilepas melalui pori-pori mikro pada pelepah daun bagian bawah.

Aulakh *et al.* (2000a), dalam penelitiannya menggunakan tujuh varietas padi yang memiliki perbedaan berdasarkan: (a) tinggi tanaman (Dular, B40, dan Intan); (b) pendek dengan hasil tinggi (IR-72 dan IR-64); (c) padi tipe baru (IR-65597); dan (d) hibrida (Magat), menemukan bahwa varietas-varietas tersebut mempunyai kapasitas angkut CH₄ (*methane transport capacity*) berbeda yang tidak hanya dipengaruhi oleh stadium tumbuh tanaman tetapi juga oleh perbedaan fisiologis dan morfologis antar varietas padi. Perbedaan kapasitas angkut metan tanaman padi terletak pada pembuluh aerenkima tanaman. Menurut Aulakh *et al.* (2000a) varietas padi mempunyai bentuk, kerapatan, dan jumlah pembuluh aerenkima yang berbeda. Kludze *et al.* (1993) juga menyebutkan bahwa pembentukan pembuluh aerenkima padi itu sendiri sangat dipengaruhi oleh redoks potensial tanah di mana pada kondisi reduksi, pembentukan pembuluh aerenkima padi semakin banyak dan rapat.

Biomassa akar dan tanaman juga berpengaruh terhadap emisi CH₄ terutama pada stadium awal pertumbuhan tanaman padi karena pada fase awal pertumbuhan banyak eksudat akar yang dilepas ke rizosfir sebagai hasil samping metabolisme karbon oleh tanaman. Menurut Aulakh *et al.* (2001), tanaman padi memiliki kemampuan berbeda dalam melepaskan eksudat akar dalam tanah. Hal ini tergantung dari efisiensi penguraian fotosintat oleh tanaman. Semakin efisien dalam mengurai fotosintat (dalam membentuk biji padi), semakin kecil eksudat akar yang dilepaskan dan emisi CH₄ semakin rendah. Dampak lain dari pengurangan pembentukan eksudat akar adalah meningkatkan produksi padi. Padi tipe baru IR-65598 dan IR-65600 mengeluarkan eksudat akar yang rendah dibanding IR-72, IR-64, IR-52, dan padi hibrida Magat (Aulakh *et al.*, 2001). Kedua padi tipe baru tersebut memiliki potensi hasil gabah yang tinggi dibanding padi lainnya. Jumlah anakan juga merupakan faktor penentu besarnya pelepasan CH₄ dari tanah sawah karena semakin banyak anakan, semakin banyak juga cerobong yang menghubungkan rizosfera dan atmosfer.

Jumlah anakan dapat meningkatkan kerapatan dan jumlah pembuluh aerenkima sehingga kapasitas angkut CH₄ menjadi besar (Aulakh *et al.* 2000b). Varietas-varietas padi yang memiliki biomassa dan anakan rendah dapat menekan pembentukan dan pelepasan CH₄ dari dalam tanah. Pengaruh varietas padi terhadap emisi CH₄ juga dievaluasi di Jakenan (Setyanto *et al.* 2004; Wihardjaka *et al.* 1999, dan Wihardjaka *et al.* 1997). Mereka menemukan bahwa lama tumbuh tanaman juga merupakan salah satu faktor penentu tingkat emisi CH₄ dari lahan sawah. Semakin lama periode tumbuh tanaman, semakin banyak eksudat dan biomassa akar yang terbentuk sehingga emisi CH₄ menjadi tinggi. Eksudat dan pembusukan akar merupakan sumber karbon bagi bakteri metanogenik. Pembentukan eksudat ini erat kaitannya dengan biomas akar, dalam arti semakin banyak biomas akar, semakin banyak pula CH₄ terbentuk (Setyanto *et al.*, 2004).

Bahan organik tanah

Bahan organik tanah merupakan bahan ameliorant penting dalam menunjang kesuburan tanah baik secara fisik, kimia maupun biologi. Menurut Soepardi (1983), setengah dari kapasitas tukar kation tanah berasal dari bahan organik. Bahan organik juga merupakan salah satu sumber hara mikro tanaman, selain sebagai sumber energi dari sebagian mikroorganisme tanah. Dalam memainkan peran tersebut, bahan organik sangat tergantung dari sumber bahan penyusunnya.

Bahan organik yang mudah terdekomposisi merupakan bahan baku utama bagi bakteri metanogenik dalam membentuk CH_4 di lahan sawah. Neue (1984), menghitung total emisi CH_4 dari lahan sawah dari total biomassa kalau dikembalikan ke dalam tanah. Dengan asumsi rata-rata 15% jerami, 50% gulma tanah dan seluruh akar tanaman ditambah biomassa akuatik (algae dan gulma); jumlah yang dikembalikan itu setiap tahun (kurang lebih setara 390 juta t biomassa atau setara 156 juta t^{-1} karbon), dan 30% karbon yang dikembalikan tersebut diubah menjadi CH_4 , maka sekitar 62,4 Tg (terra gram = 10^{12} g) CH_4 akan dihasilkan dari lahan sawah setiap tahunnya di seluruh dunia.

Schutz *et al.* (1989) melaporkan bahwa penambahan jerami kering 3 t ha^{-1} menghasilkan emisi CH_4 0,5 kali lebih tinggi dibanding dengan tanpa pemberian jerami, dua kali lebih tinggi pada penambahan 5 t ha^{-1} , dan 2,4 kali lebih tinggi pada penambahan 12 t ha^{-1} . Sedangkan penambahan 60 t ha^{-1} jerami memberikan emisi yang sama dengan pemberian 12 t ha^{-1} . Dari hasil penelitian tersebut ditemukan pula bahwa lahan sawah dengan penambahan jerami, urea dan amonium sulfat memberi emisi yang lebih tinggi dibanding lahan yang hanya sekedar diberi jerami (tanpa pemupukan). Yagi dan Minami (1990) menemukan bahwa penambahan jerami 6 t ha^{-1} dapat meningkatkan emisi CH_4 1,8 – 3,3 kali lebih besar dibanding hanya pemberian pupuk anorganik. Pada penambahan 9 t ha^{-1} emisi CH_4 yang dihasilkan 3,5 kali lebih besar. Hal yang menarik dari penelitian ini adalah bahwa penambahan jerami yang sudah menjadi kompos (terhumifikasi) tidak memberi emisi yang tinggi.

MITIGASI CH_4 PADA LAHAN SAWAH DI JAWA

Mitigasi gas CH_4 dengan varietas padi

Konsep utama dalam mitigasi emisi CH_4 dari lahan sawah adalah dengan meningkatkan konsentrasi oksigen pada lapisan anaerobik tanah (rizosfir) dan mengurangi suplai karbon yang mudah terurai. Dengan bertambahnya konsentrasi oksigen, proses produksi CH_4 dapat berkurang karena CH_4 teroksidasi secara biologi oleh bakteri metanotropik. Peran tanaman padi dalam emisi CH_4 adalah (i) dapat meningkatkan proses metanogenesis melalui pelepasan eksudat akar yang kaya akan sumber karbon tersedia; (ii) perakaran padi juga berperan dalam proses oksidasi CH_4 menjadi CO_2 karena kemampuan akar melakukan pertukaran oksigen; (iii) sebagai bentuk keseimbangan termodinamik, sekitar 60-90% dari CH_4 yang

diproduksi di lapisan rizosfir dilepaskan ke atmosfer melalui pembuluh aerenkima tanaman. Penentuan penanaman varietas padi di suatu daerah umumnya dikaitkan dengan potensinya dalam memberikan hasil tinggi, tahan terhadap kondisi ekstrim seperti keracunan besi, sulfat, kekeringan, hama dan penyakit, serta ramah lingkungan. Sehubungan dengan konsepsi ramah lingkungan, perlu dipertimbangkan penanaman varietas padi dalam emisi CH_4 . Data emisi CH_4 dari berbagai varietas unggul baru padi sawah belum banyak dikaji secara mendalam.

Tabel 3 merupakan kompilasi dari data penelitian peranan varietas padi dalam emisi CH_4 di Jakenan. Varietas Cisadane ternyata paling tinggi dalam mengemisi CH_4 , diikuti Batang Anai, IR-64, Memberamo, Way Apo Buru, Muncul, Maros, IR-36, dan yang paling rendah yaitu Dodokan. Hal ini disebabkan oleh periode tumbuh yang berbeda dari varietas-varietas tersebut, sehingga suplai eksudat akar bagi bakteri metanogenik untuk pembentukan CH_4 juga berbeda. Varietas Cisadane diduga memiliki kemampuan fotosintesis lebih baik dibanding varietas lain, sehingga eksudat akar berupa senyawa karbon yang mudah terdegradasi lebih banyak dihasilkan. Susunan dan jumlah akar tanaman juga sangat menentukan pembentukan eksudat akar. Semakin banyak dan merata perakaran tanaman semakin besar distribusi eksudat ke dalam lapisan tanah (Setyanto *et al.*, 2004). Selain itu, akar padi juga mempunyai kemampuan melakukan pertukaran gas dalam rangka menjaga keseimbangan termodinamik yang dikenal dengan istilah kapasitas pengoksidasi akar (*root oxidizing power*). Pertukaran gas ini menyebabkan konsentrasi O_2 di sekitar perakaran meningkat dan konsentrasi CH_4 teroksidasi secara biologi oleh bakteri metanotropik. Diduga varietas Dodokan dan IR-36 mempunyai kapasitas pengoksidasi akar yang lebih baik dibanding varietas-varietas padi lainnya.

Data dalam Tabel 3 juga menyajikan produksi padi per kg CH_4 untuk masing-masing varietas padi. Proporsi tersebut bisa digunakan untuk menduga berapa emisi gas CH_4 yang akan dihasilkan bila menanam suatu varietas tertentu. Misalnya, Memberamo mempunyai indeks 48,1, untuk menghasilkan 5 t gabah⁻¹ ha⁻¹; emisi CH_4 satu musim dapat diduga sebesar 103,9 kg ha⁻¹, sedangkan apabila IR-64 yang ditanam, emisi CH_4 yang akan dihasilkan sebesar 128,5 kg ha⁻¹. Hasil kajian ini bisa digunakan sebagai indeks untuk menghitung tingkat emisi CH_4 di lahan sawah yang ditanami varietas padi tertentu.

Dari hasil penelitian ini, diharapkan suatu saat para pemulia tanaman tidak hanya terfokus untuk mendapatkan varietas-varietas padi yang tahan terhadap kondisi ekstrim seperti kekeringan, keracunan besi dan sulfat atau mendapatkan varietas yang tahan terhadap hama penyakit endemik, tetapi bisa juga mencari faktor-faktor genetik tanaman padi yang dapat meningkatkan kapasitas pengoksidasi perakaran sehingga emisi CH_4 melalui tanaman padi bisa ditekan.

Tabel 3. Emisi CH_4 dan hasil gabah dari beberapa varietas padi yang ditanam di Indonesia per musim tanam

Varietas	Emisi CH_4	Hasil gabah	Produksi padi
----------	---------------------	-------------	---------------

			per kg CH ₄
	Kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Dodokan	74	3,3	44,5
IR-36	112	4,9	43,8
Cisadane	218	6,4	29,4
Muncul	127	4,6	36,2
Maros*	117	4,3	36,7
IR-64	176	6,7	38,1
Way Apo Buru	154	7,4	48,1
Memberamo	173	7,4	42,8
Batang Anai*	196	4,5	23,2

* hanya dilakukan satu musim

Sumber: Wihardjaka *et al.* (1997), Wihardjaka *et al.* (1999), dan Setyanto *et al.* (2004)

Pupuk anorganik

Sejak dicanangkannya revolusi hijau di era tahun 1960, produksi padi di Asia meningkat dengan rata-rata 3,8% tahun⁻¹. Penggunaan pupuk anorganik secara intensif dan penemuan varietas-varietas padi berumur genjah merangsang tingkat kenaikan produksi padi karena bisa menambah periode tanam. Amonium sulfat ((NH₄)₂SO₄) dan urea (CO(NH₂)₂) dengan kandungan N berturut-turut sebesar 20,5% dan 45% adalah sumber N utama buat tanaman padi yang pemakaiannya meningkat sejak tahun 1975. Penggunaan pupuk tersebut ternyata berperan besar terhadap emisi dan mitigasi CH₄ dari lahan sawah.

Pupuk ZA berperan dalam menekan emisi CH₄ karena ion sulfat (SO₄²⁻) sebagai hasil samping dari hidrolisis ZA dapat memperlambat penurunan potensi redoks tanah (Eh). Selain itu unsur S (*sulfur*) dalam pupuk tersebut adalah salah satu penghambat perkembangan bakteri metanogenik (Schutz *et al.*, 1989). Jakobsen *et al.* (1981) dalam penelitiannya menemukan adanya persaingan antara bakteri pereduksi sulfat dengan bakteri pembentuk CH₄ dalam memanfaatkan substrat atau sumber energi yang tersedia dalam tanah (senyawa organik). Persaingan antara kedua bakteri tersebut dalam memperoleh sumber energi menyebabkan pembentukan CH₄ terhambat.

Urea memberi pengaruh yang berbeda dalam menekan emisi CH₄. Amonium (NH₄⁺) yang diserap oleh tanaman padi akan diseimbangkan dengan pelepasan H⁺ di sekitar perakaran padi, hal ini menjadi penyebab turunnya kemasaman di daerah perakaran padi sehingga dapat menghambat perkembangan bakteri metanogenik.

Pemberian pupuk anorganik di lahan sawah irigasi dapat menekan emisi CH_4 sekaligus meningkatkan hasil gabah dibanding tanpa pemupukan. Pemberian 90 kg N ha^{-1} dalam bentuk ZA (Tabel 4) dengan cara disebar maupun dibenam, mampu menekan emisi sebesar rata-rata sebesar 53% dengan kenaikan hasil gabah rata-rata 34% dibanding tanpa pemupukan. Hasil gabah juga cenderung lebih tinggi pada pemberian ZA dibanding urea tabur baik dengan cara disebar maupun dibenam (Tabel 4). Petani secara umum jarang mengembalikan sisa jerami hasil panen ke dalam tanah karena cenderung digunakan untuk pakan ternak. Oleh karena itu, di lahan sawah yang intensif ditanami padi cenderung mengalami kahat S sehingga tanggap tanaman padi pada pemberian pupuk ZA lebih baik dibanding urea tabur.

Tabel 4. Emisi CH_4 dari berbagai jenis pupuk dan cara pemupukan per musim tanam

Cara pemupukan	Jenis pupuk					
	Urea tabur		ZA		Urea tablet	
	Emisi CH_4	Hasil gabah	Emisi CH_4	Hasil gabah	Emisi CH_4	Hasil gabah
	kg ha^{-1}	t ha^{-1}	kg ha^{-1}	t ha^{-1}	kg ha^{-1}	t ha^{-1}
Disebar 1x	109	4,0	99	4,6	157	6,0
Disebar 2x	182	5,1	175	5,6		
Disebar 3x	180	5,3	170	6,3		
Dibenam 3 cm	152	4,6	136	4,5		
Tanpa N	209	3,0				

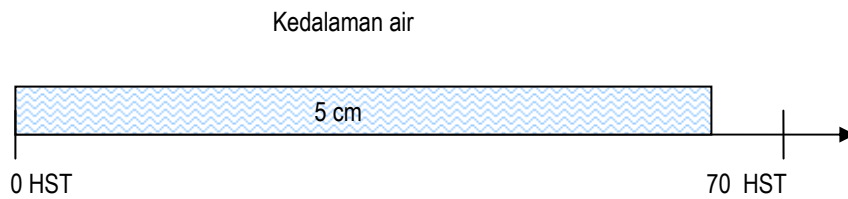
Sumber: Setyanto *et al.*, 1997 dan Setyanto *et al.*, 1998

Teknik pengairan

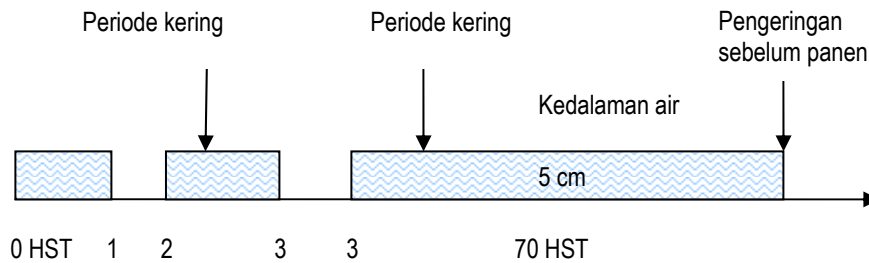
Pada dasarnya tanaman padi tidak membutuhkan keadaan tergenang selama proses pertumbuhannya. Penggenangan secara terus menerus dianggap sebagai suatu pemborosan pemakaian sumber daya air. Gerakan hemat air juga dicanangkan untuk mengurangi pemakaian air yang berlebihan di sektor pertanian karena sumber daya alam ini sangat terbatas. Penelitian di Jakenan menunjukkan bahwa pengurangan volume air yang dialirkan ke lahan sawah tidak berpengaruh terhadap produksi padi. Selain itu, pengelolaan air irigasi dapat mempengaruhi pH, Eh tanah, reaksi-reaksi kimia, serta aktivitas mikroorganisme tanah yang berhubungan dengan emisi GRK.

Dari Tabel 5 kondisi tanah dengan penggenangan berlanjut (*continuously flooded*, Gambar 3) relatif mengemisi CH_4 lebih tinggi dibanding macak-macak (*saturated irrigation*, Gambar 4) dan pengairan berselang (*intermittent irrigation*,

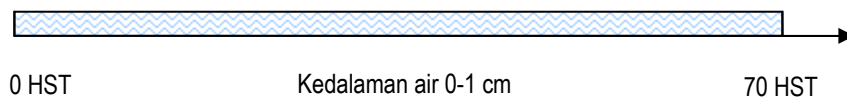
Gambar 5). Pengairan berselang dan penggenangan berlanjut memberi kontribusi emisi CH_4 berturut-turut sebesar 77 dan 164 kg ha^{-1} pada cara tanam pindah (Tapin), 57 dan 91 kg ha^{-1} pada cara tabur benih langsung (Tabela). Laju penekanan emisi CH_4 pada cara pengairan berselang rata-rata sebesar 46,5% dibanding cara pengairan berlanjut. Penggenangan menyebabkan Eh tanah turun, nilai pH mendekati netral dan dekomposisi bahan organik secara anaerobik berlangsung yang menyebabkan terbentuknya gas CH_4 . Saat saat petak sawah dikeringkan pada pengairan berselang, oksigen akan terdifusi dengan cepat ke dalam tanah dan Eh tanah meningkat sehingga dekomposisi aerobik lebih dominan.



Gambar 3. Skema pengairan berlanjut dimana tanaman padi mengalami penggenangan terus dari 0 hari setelah tanam (HST) sampai menjelang panen (70 HST).



Gambar 4. Cara pengairan berselang untuk varietas padi IR-64. Pengerinan dilaksanakan dua kali pada 15-20 HST dan 30-35 HST.



Gambar 5. Pengairan dengan tinggi air antara 0 – 1 cm (macak-macak).

Hasil panen gabah seperti yang tercantum pada Tabel 4 ternyata tidak menunjukkan perbedaan berarti antar sistem pengairan. Hal ini menunjukkan bahwa pengairan berselang dan macak-macak secara signifikan berpengaruh terhadap mitigasi emisi gas CH₄ dari lahan sawah tanpa mempengaruhi hasil padi.

Tabel 5. Emisi gas CH₄ dan hasil gabah dari berbagai perlakuan pengairan dan cara pengelolaan tanaman per musim tanam

Pengairan	Cara pengelolaan					
	OTS, tapin		OTS, tabela		TOT, tabela	
	Emisi CH ₄	Hasil gabah	Emisi CH ₄	Hasil gabah	Emisi CH ₄	Hasil gabah
	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹
Tergenang	164	5,1	91	5,21	66	5,1
Pengairan berselang	77	4,8	57	4,7	37	4,9
Macak-macak	70	4,5				

Sumber: Suharsih *et al.*, 1998 dan Suharsih *et al.*, 1999

OTS= olah tanah sempurna; tapin= tanah pindah; tabela= tanam bening lahan

Herbisida

Walaupun belum ada bukti ilmiah yang menunjukkan bahwa pemakaian herbisida berpengaruh terhadap emisi CH₄, tetapi dari penelitian yang dilaksanakan di Jakenan menunjukkan adanya penurunan tingkat emisi CH₄ setelah pemberian paraquat dan glifosat. Dalam Tabel 6 terlihat bahwa pemberian herbisida pada beberapa cara pengelolaan tanah sawah menurunkan emisi CH₄ antara 28-74% dibanding tanpa penggunaan herbisida. Bahan aktif dari herbisida diduga dapat menghambat perkembangan bakteri metanogenik pada proses dekomposisi bahan organik secara anaerobik. Informasi tentang dampak penggunaan bahan-bahan

agrokimia ini terhadap emisi gas CH₄ dan bagaimana bahan aktif tersebut dapat menekan pertumbuhan bakteri metanogenik masih belum diketahui. Sathpaty *et al.* (1998) pada penelitian dengan pestisida menduga bahwa organoklorin dan hexakloro-sikloheksan (HCH) pada tanah sawah dapat menekan perkembangan bakteri metanogenik pada takaran 2 kg bahan aktif ha⁻¹. Penggunaan herbisida kelihatannya berdampak positif terhadap mitigasi emisi CH₄, tetapi penggunaannya harus sesuai anjuran supaya tidak berdampak terhadap kerusakan lingkungan lainnya seperti pencemaran terhadap sumber daya air, tanah dan produk pertanian. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan mengingat banyaknya produk herbisida, pestisida dan fungisida yang beredar tetapi dampaknya terhadap emisi GRK belum diketahui.

Tabel 6. Emisi gas CH₄ dan hasil padi pada beberapa cara pengelolaan tanah sawah dengan penambahan herbisida (takaran 3 kg bahan aktif ha⁻¹) di Jakenan per musim tanam

Perlakuan	Total emisi CH ₄ kg ha ⁻¹	Hasil padi t ha ⁻¹
Tergenang, OTS*	422	5,2
Tergenang, TOT**, paraquat	158	4,8
Tergenang, TOT, glifosat	180	4,6
Pengairan berselang, OTS	246	5,1
Pengairan berselang, TOT, paraquat	177	4,7
Pengairan berselang, TOT, glifosat	143	4,7
Macak-macak, OTS	240	4,7
Macak-macak, TOT, paraquat	61	4,6
Macak-macak, TOT, glifosat	88	4,6

*OTS : olah tanah sempurna

**TOT : tanpa olah tanah

Sumber: Setyanto *et al.* (2003)

PENUTUP

Lahan sawah memiliki arti strategis dalam ketahanan pangan tetapi di sisi lain, lahan sawah merupakan salah satu kontributor emisi CH₄ terbesar. Kenyataan juga menunjukkan bahwa beberapa teknik untuk peningkatan produksi dan perbaikan sifat tanah seperti pemberian bahan organik dan pengairan terus menerus justru meningkatkan emisi CH₄. Namun terdapat beberapa teknik budi daya padi yang dapat menekan emisi CH₄ diantaranya; (i) penggunaan varietas padi yang berumur genjah

berpeluang menekan laju produksi dan emisi gas CH₄ di rizosfir tanah dibanding yang berumur dalam, varietas padi yang memiliki efisiensi tinggi dalam mengurai fotosintat dapat meningkatkan produksi padi dan menghambat pembentukan CH₄ dari dalam tanah; (ii) pemberian ZA ke lahan sawah pada takaran 90 kg N ha⁻¹ sangat nyata menekan emisi CH₄, tetapi ZA harus diberikan dalam tanah secara bijaksana karena tidak semua tanah sawah punya tanggap yang baik terhadap pemupukan ZA; (iii) terputusnya penurunan Eh melalui pengairan berselang dapat menekan emisi CH₄ dibanding pengairan terus menerus; dan (iv) pemakaian herbisida yang tepat dengan takaran 3 kg bahan aktif ha⁻¹ dapat menekan emisi CH₄ rata-rata sebesar 51%, tetapi penelitian lebih lanjut perlu dilakukan karena informasi mengenai dampak penggunaan herbisida terhadap produksi dan emisi CH₄ masih sedikit.

Apapun yang bisa dilakukan dalam memitigasi CH₄ dari lahan sawah tetap tidak melupakan satu hal yaitu meningkatkan produksi padi. Teknik budi daya padi yang disampaikan dalam bab ini tetap difokuskan pada perlakuan yang dapat menekan emisi CH₄ dan memberikan hasil padi tinggi.

Konsep dasar perdagangan karbon seperti yang dijelaskan dalam mekanisme pembangunan bersih, saat ini hanya terfokus pada upaya menekan salah satu GRK yaitu CO₂. Untuk gas CH₄ belum ada konsep dasar yang jelas walaupun selalu disebut dalam setiap pertemuan tentang perubahan iklim baik skala Nasional maupun Internasional. Hal ini disebabkan anggapan bahwa emisi CH₄, terutama dari lahan sawah, sangat kecil dibanding emisi CO₂ yang diakibatkan oleh kerusakan hutan dan pembakaran bahan bakar fosil. Kenyataannya, upaya menekan pelepasan emisi CH₄ dari lahan sawah juga memiliki peran strategis karena kebutuhan akan pangan dari tahun ke tahun menunjukkan pola yang meningkat. Ekstensifikasi dan intensifikasi pertanian untuk menjawab tantangan ketahanan pangan mempunyai akses yang dapat meningkatkan emisi CH₄, dan setiap molekul CH₄ sendiri memiliki potensi pemanasan global (Global Warming Potensial) 21 kali lebih besar dari CO₂.

DAFTAR PUSTAKA

- Aulakh, M.S., J. Bodenbender, R. Wassmann, and H. Rennenberg. 2000a. Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 58: 367-375.
- Aulakh, M.S., R. Wassmann, H. Rennenberg, and S. Fink. 2000b. Pattern and amount of aerenchyma relate to variable methane transport capacity of different rice cultivars. *Plant Biology* 2: 182-194.
- Aulakh, M.S., R. Wassmann, C. Bueno, J. Kreuwieser, and H. Rennenberg. 2001. Characterization of root exudates at different growth stages of ten rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Plant Biology* 3: 139-148.

- Boer, R. 2002. Masalah gas rumah kaca: hubungannya dengan lingkungan pertanian. Disajikan dalam Seminar: Peningkatan Kualitas dan Produk Pertanian. Hotel Gripta, Kudus, 4 Nopember 2002.
- Gupta, J. 1997. The climate change convention and developing countries: from conflict to consensus. pp 55-65. *In*. Institute of Environmental Studies. Free University Amsterdam. Amsterdam, The Netherlands
- Holzapfel-Pschorn, A. and W. Seiler. 1986. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. *Journal of Geophysical Research* 91: 11.803-11.814.
- Jakobsen, P., W.H Jr. Patrick, B.G. Williams. 1981. Sulfide and methane formation and soils and sediments. *Soil Science* 132: 279-287.
- Kludze, H.K., R.D. Delaune and W.H.Jr. Patrick. 1993. Aerenchyma formation and CH₄ and oxygen exchange in rice. *J Soil Science Society of America Journal* 57: 386-391.
- Neue, H.U. and H.W. Scharpenseel. 1984. Gaseous products of the decomposition of organic matter in submerged soils. pp 311-328. *In*. Organic Matter and Rice. IRRI. Manila, Philippines.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soil. *Advancel Agronomy* 24: 29-96.
- Raimbault, M., G. Rinando, L. Garcia, and M. Boureau. 1977. A device to study metabolic gases in the rice rhizosphere. *Biology and Biochemistry* 9: 193-196.
- Rennenberg, H., R. Wassmann, H. Papen, and W. Seiler. 1992. Trace gas exchange in rice cultivation. *Ecology Bulletin*, 42: 164-173
- Satpathy, S.N., S. Mishra, T.K. Adhya, B. Ramakrishnan, V.R. Rao, and N. Sethunathan. 1998. Cultivar variation in methane efflux from tropical rice. *Plant and Soil* 202: 223-229.
- Schutz, H., Holzapf-Pshorn, R. Conrad, H. Rennenberg, and W, Seiler. 1989. A 3-year continuous record on the influence of daytime season and fertilizer treatment on methane emission rate from an Italian rice paddy field. *Journal of Geophysical Research* 94: 1.6405-1.6416.
- Schutz, H., W. Seiler, and R. Conrad. 1989. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochemistry* 11: 77-95.
- Setyanto, P., Suharsih. A. Wihardjaka, dan A.K. Makarim. 1997. Pengaruh Pemberian Ammonium Sulfat dan Urea terhadap Pembentukan Gas Metan di Lahan Sawah. Laporan Tahunan Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Setyanto, P., Suharsih. A. Wihardjaka, dan A.K. Makarim. 1998. Pengaruh Pemberian

- Pupuk Anorganik terhadap Emisi Gas Metan pada Lahan Sawah. Laporan Tahunan Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Setyanto, P., H. Burhan, Suharsih, and N. Orbanus. 2003. The Effect of Water Regime and Soil Management on Methane Emission from Rice Fields. Laporan kerjasama penelitian dengan Syngenta R and D station, Cikampek dan Loka Penelitian Pencemaran Lingkungan Pertanian Jakenan.
- Setyanto, P., A.B. Rosenani, M.J. Khanif, C.I. Fauziah, dan R. Boer. 2004. Methane Emission and its Mitigation in Rice Fields Under Different Management Practices in Central Java. Ph.D. Thesis, Universiti Putra Malaysia.
- Soepardi, G. 1983. Sifat dan Ciri Tanah. Institut Pertanian Bogor
- Suharsih., P. Setyanto, A. Wihardjaka, dan A.K. Makarim. 1998. Emisi Gas Metan dari Berbagai Sistem Pengaturan Air pada Lahan Sawah. Laporan Tahunan Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Suharsih., P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 1999. Pengaruh Rejim Air Tanah terhadap Besarnya Emisi Gas Metan pada Lahan Sawah. Laporan Tahunan Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Vogels, G.D., J.T. Keltjens, and C. Van der Drift. 1988. Biochemistry of methane production biology of and aerobic microorganisms. *Nature* 350: 406-409.
- Wagatsuma, T., T. Nakashima, K. Tawaraya, S. Watanabe, A. Kamio, and A. Ueki. 1990. Role of plant aerechyma in wet tolerance and methane emission from plants. pp 455-461. *In*. Plant nutrition-plant physiology and application. Kluwer Academic Publisher.
- Wang, Z.P., R.D. DeLaune, P.H. Masscheleyn, and W.H. Patrick. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Journal Soil Science Society America* 57: 382-385.
- Wihardjaka, A., P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 1997. Pengaruh Varietas Padi terhadap Besarnya Emisi Gas Metan pada Lahan Sawah. Laporan Tahunan Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Wihardjaka, A., P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 1998. Pengaruh Varietas Padi terhadap Besarnya Emisi Gas Metan pada Lahan Sawah. Laporan Tahunan Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Wihardjaka, A., P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 1999. Emisi Gas Metan dari Berbagai Varietas Padi. Laporan Tahunan Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Yagi, K. and K. Minami. 1990. Effect of soil organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science Plant Nutr* 36: 599-610.

Yamane, I. and S, Sato. 1961. Effect of temperature on the formation of gases and ammonium nitrogen in the waterlogged soils. Institute of Agricultural Research. Tokoku Univ. 12: 1-10.

11. ALIH GUNA DAN ASPEK LINGKUNGAN LAHAN SAWAH

Fahmuddin Agus dan Irawan

Lahan sawah tidak hanya penting sebagai penghasil padi dan palawija yang merupakan barang privat (*private goods*) yang memberikan keuntungan kepada petani, tetapi juga memberikan barang dan jasa publik (*public services*) yang dikenal dengan istilah multifungsi. Berbagai multifungsi yang penting antara lain adalah penopang ketahanan pangan, penyedia lapangan kerja, penjaga kelestarian budaya, memberikan suasana nyaman pedesaan, serta berbagai jasa lingkungan lainnya.

Fungsi positif atau dapat juga disebut sebagai eksternalitas positif (*positive externalities*) lingkungan lahan sawah antara lain adalah untuk mitigasi atau pengendali banjir, mendaur ulang air, pengendali atau pengontrol erosi, mitigasi peningkatan suhu udara, dan mendaur ulang limbah organik. Namun demikian terdapat beberapa masalah berupa eksternalitas negatif (*negative externalities*) dari lahan sawah, antara lain adalah emisi gas metan.

Pesatnya pembangunan dan pertambahan jumlah penduduk, menyebabkan terjadinya alih guna lahan sawah secara cepat. Dari berbagai bentuk penggunaan lahan pertanian, lahan sawah merupakan penggunaan lahan yang banyak mengalami alih guna, terutama di sepanjang pantai Utara Pulau Jawa (Pantura) dan di pusat pembangunan lainnya. Pada umumnya alih guna lahan sawah bersifat tidak dapat balik (*irreversible*) dan dapat membawa kemerosotan terhadap kualitas lingkungan.

Nishio (1999) menyajikan data yang isinya memperlihatkan peningkatan frekuensi banjir di Tokyo disebabkan oleh pesatnya pembangunan perindustrian pada tahun 1980-an yang mengorbankan lahan sawah. Keadaan yang sama juga terjadi di Indonesia, terutama pada daerah perkotaan. Banjir lebih sering terjadi di sekitar perkotaan, dan ini dapat dihubungkan dengan makin meluasnya alih guna lahan pertanian, termasuk lahan sawah.

Lahan sawah yang ada sekarang termasuk infrastrukturnya, dibangun dengan biaya yang sangat tinggi. Sumaryanto *et al.* (2001) memperkirakan bahwa diperlukan biaya sekitar Rp 25.000.000 untuk mencetak sawah baru dan membangun prasarana pendukungnya. Walaupun biaya pencetakan sawah sangat tinggi, namun alih guna lahan sawah menjadi lahan nonpertanian berlangsung semakin cepat.

Alasan yang menyebabkan tingginya tingkat alih guna lahan antara lain adalah karena investasi di bidang nonsawah (setidak-tidaknya untuk jangka pendek) jauh lebih menjanjikan. Bahkan menurut Syafa'at *et al.* 1995, dalam Sumaryanto (2001) di

sekitar pusat pembangunan, nilai rente (sewa) lahan sawah dibandingkan dengan lahan untuk permukiman dan industri berturut-turut bisa mencapai 1:622 dan 1:500. Lagi pula budi daya padi sawah memerlukan tenaga kerja, biaya pembelian pupuk dan obat-obatan yang tinggi, namun harga jual berasnya sangat rendah.

Peningkatan ketahanan pangan, yang dalam pengejawantahannya adalah swasembada beras, merupakan target yang sangat penting bagi pemerintah. Namun, rendahnya daya tarik untuk bertani, akan berdampak pada semakin ditinggalkannya sektor pertanian oleh petani dan selanjutnya akan memposisikan Indonesia semakin sulit mencapai sasaran swasembada beras.

Alih guna lahan sawah semakin berlanjut dan peraturan yang berkaitan dengan tata guna lahan belum diterapkan dengan benar sehingga kenyataan di lapangan jauh berbeda dengan apa yang terkandung di dalam peraturan tersebut. Tingginya tingkat alih guna lahan sawah merupakan ancaman yang serius bagi lingkungan dan pencapaian ketahanan pangan di masa mendatang serta akan semakin meningkatkan ketergantungan Indonesia kepada beras impor.

Bab ini membahas tentang alih guna lahan sawah dan berbagai aspek lingkungan dari lahan sawah. Aspek lingkungan yang dimaksud antara lain adalah multifungsi (eksternalitas positif), sifat intrinsik lahan sawah untuk menjaga kelestariannya, eksternalitas negatif, serta ancaman dari areal permukiman dan industri terhadap kualitas lingkungan lahan sawah.

ALIH GUNA LAHAN SAWAH

Alih guna/konversi lahan sawah mempunyai dampak positif dan negatif. Alih guna lahan sawah menjadi lahan permukiman dan industri, misalnya merupakan masalah nasional yang memberikan berbagai dampak, terutama terhadap ketahanan pangan, berkurangnya kesempatan kerja di bidang pertanian (tenaga kerja yang berlatar belakang pertanian mempunyai kesempatan kecil memasuki lapangan kerja di bidang industri), dan terhadap lingkungan. Untuk itu, sebelum membahas aspek lingkungan lahan sawah perlu dibahas topik tentang alih guna lahan sawah.

Antara tahun 1981 dan 1999, sekitar satu juta hektar lahan sawah di Jawa (mencapai 30% total luas sawah di Jawa) dan sekitar 0,6 juta ha lahan sawah di luar Jawa (sekitar 17% total luas sawah di luar Jawa) telah mengalami alih guna (Tabel 1). Antara tahun 1999 dan 2003, neraca luas lahan sawah menjadi negatif, baik di Pulau Jawa, maupun di luar Pulau Jawa. Alih guna ini jelas merupakan salah satu penyebab meningkatnya ketergantungan terhadap beras impor kalau tidak diimbangi dengan ekstensifikasi dan intensifikasi. Apabila diasumsikan bahwa hasil gabah kering giling 6 t gabah ha⁻¹ tahun⁻¹ (dengan asumsi 4 t ha⁻¹ untuk setiap panen dan indeks panen 1,5), alih guna sawah tidak terjadi, dan pencetakan sawah tetap berlanjut pada tingkat seperti pada Tabel 1, maka produksi tahunan beras

seharusnya sekitar 9,6 juta ton ($6 \text{ t ha}^{-1} \times 1,6 \text{ juta ha}$) lebih tinggi dari tingkat produksi yang ada pada tahun 1999 tersebut. Investasi yang telah dikeluarkan untuk infrastruktur dan tingkat produktivitas lahan sawah irigasi di Jawa yang tidak tertandingi oleh produktivitas lahan di luar Jawa, terbuang percuma karena adanya alih guna lahan sawah.

Tabel 1. Alih guna, penambahan dan neraca lahan sawah antara tahun 1981 dan 1999 dan antara tahun 1999 dengan tahun 2002

Wilayah	Beralih guna	Penambahan	Neraca
	————— ha —————		
Neraca lahan sawah tahun 1981-1999¹⁾			
Jawa	1.002.055	518.224	-483.831
Luar Jawa	625.459	2.702.939	+2.077.480
Indonesia	1.627.514	3.221.163	+1.593.649
Neraca lahan sawah 1999-2002²⁾			
Jawa	167.150	18.024	-107.482
Luar Jawa	396.009	121.278	-274.732
Indonesia	563.159	139.302	-423.857

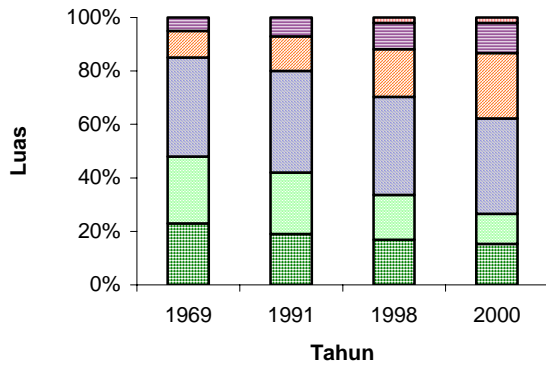
Sumber: Diolah dari Biro Pusat Statistik (2003)

¹⁾ Irawan *et al.* (2001) mengutip Biro Pusat Statistik, berbagai tahun.

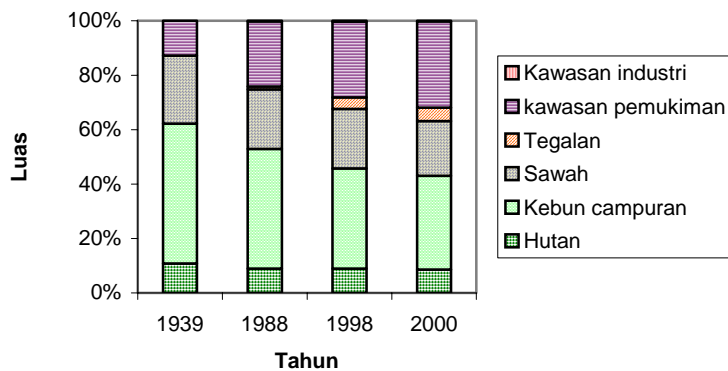
²⁾ Diolah dari Catatan: Pada tahun 1981, 1999, dan 2002 luas lahan sawah berturut-turut adalah 7.059.000, 8.652.649, dan 8.228.782 ha.

Wahyunto *et al.* (2001) meneliti di sub-daerah aliran sungai (DAS) Citarik, Jawa Barat yang luasnya sekitar 26.370 ha dan di DAS Kaligarang, Jawa Tengah dengan luas areal 20.080 ha. Kedua DAS ini mengalami perubahan penggunaan lahan yang pesat (Gambar 1) karena pembangunan industri dan permukiman terjadi pada areal persawahan.

A. Sub-DAS Citarik



B. DAS Kaligarang



Gambar 1. Alih guna lahan di sub-DAS Citarik (luas 26.370 ha) dan DAS Kaligarang (luas 20.080 ha) (diolah dari Wahyunto *et al.*, 2001)

Pada tahun 1969, tata guna lahan di sub-DAS Citarik terdiri atas hutan dan belukar 23%, perkebunan campuran (tanaman semusim bercampur dengan pohon-pohonan) 25%, sawah 37%, tegalan 10%, dan perumahan dan pekarangan 5%. Luas hutan menurun menjadi 19% pada tahun 1991 dan selanjutnya menurun lagi menjadi hanya 15% pada tahun 2000. Luas lahan sawah juga menurun dalam tiga dekade terakhir, walaupun penurunannya tidak secepat penurunan luas hutan. Hal ini kelihatannya disebabkan oleh adanya pencetakan sawah baru selama kurun waktu 30 tahun ini, seperti yang terjadi pada data tingkat nasional (Tabel 1). Di sisi lain, areal yang digunakan untuk tegalan meningkat dengan berjalannya waktu disebabkan oleh alih guna lahan

kebun campuran dan hutan menjadi tegalan. Sementara itu, sejalan dengan peningkatan jumlah penduduk, areal perumahan dan industri meluas pada lahan yang dulu didominasi oleh sawah dengan produktivitas tinggi serta lahan pertanian lainnya (Wahyunto *et al.*, 2001). Analisis penginderaan jauh dan pengecekan di lapangan oleh Wahyunto *et al.* (2001) di sub-DAS Citarik, dengan jelas memperlihatkan bahwa pabrik tekstil dan permukiman kebanyakan terletak di tengah persawahan yang lengkap dengan prasarana irigasi.

Di DAS Kaligarang, proporsi hutan sudah sedikit (11%) sejak tahun 1939 dan semakin menciut menjadi 9% pada tahun 2000. Seperti di sub-DAS Citarik, sebagian lahan pertanian menyempit sedangkan areal perumahan dan industri meluas. Sawah sedikit mengalami perubahan luas karena adanya pencetakan sawah baru di samping alih guna.

Alih guna lahan pertanian menjadi nonpertanian cenderung meningkat dan tidak membedakan apakah lahan pertanian tersebut mempunyai produktivitas tinggi atau rendah. Ada beberapa penyebab tingginya tingkat alih guna lahan (Agus *et al.*, 2001), diantaranya adalah rendahnya tingkat keuntungan bertani padi sawah, tidak dipatuhinya peraturan tata ruang (lemahnya penegakan hukum tentang tata ruang), keinginan mendapatkan keuntungan jangka pendek dari pengalihgunaan lahan sawah, dan rendahnya koordinasi antar lembaga dan departemen terkait dalam perencanaan penggunaan lahan. Kesempatan menjual sawah pada daerah yang dicanangkan sebagai pusat pengembangan industri dan perumahan, merupakan kesempatan yang menggiurkan bagi sebagian pemilik lahan sawah untuk mendapatkan uang tunai secara cepat untuk investasi pada sektor nonpertanian.

ASPEK LINGKUNGAN LAHAN SAWAH

Ada tiga aspek lingkungan yang berkaitan dengan lahan sawah, yaitu (i) kontribusi positif atau eksternalitas positif atau lebih dikenal dengan multifungsi lahan sawah terhadap pengamanan kualitas lingkungan; (ii) pengaruh negatif atau eksternalitas negatif lahan sawah terhadap lingkungan, terutama yang berkenaan dengan emisi gas metan (CH₄) yang dihasilkan oleh lahan sawah; dan (iii) terancamnya kualitas lingkungan lahan sawah karena terkontaminasi oleh limbah industri. Ketiga aspek ini diuraikan dalam bagian berikut.

Eksternalitas positif (multifungsi) lahan sawah

Istilah multifungsi digunakan untuk menerangkan fungsi lahan sawah sebagai penghasil jasa, yang terdiri atas jasa lingkungan, penyangga ekonomi dalam keadaan krisis, penggalang ketahanan pangan, perekat nilai budaya dan sosial di pedesaan, serta penghasil daya tarik pedesaan. Dalam sistem pasar dan kebijakan yang ada sekarang, nilai jasa-jasa tersebut jarang diperhitungkan (di

berlakukannya sebagai eksternalitas dalam sistem produksi) karena pada umumnya bersifat tidak nyata (*intangible*) dan sulit dinilai secara ekonomi. Eksternalitas positif atau multifungsi yang dapat disumbangkan oleh lahan sawah antara lain adalah:

- a. Mitigasi banjir
- b. Pengendali erosi dan sedimentasi
- c. Mitigasi peningkatan suhu udara
- d. Pendaaur ulang sumber daya air
- e. Penampung limbah organik
- f. Pengurang kadar nitrat pada air tanah

Mitigasi banjir

Mitigasi banjir lahan sawah adalah kemampuan lahan sawah untuk menahan/menampung air hujan dan air aliran permukaan, menurunkan aliran permukaan dan menekan intensitas serta frekuensi banjir di daerah hilir. Mitigasi banjir dapat diukur dengan kriteria daya sangga air (*water retaining capacity*) dari lahan sawah.

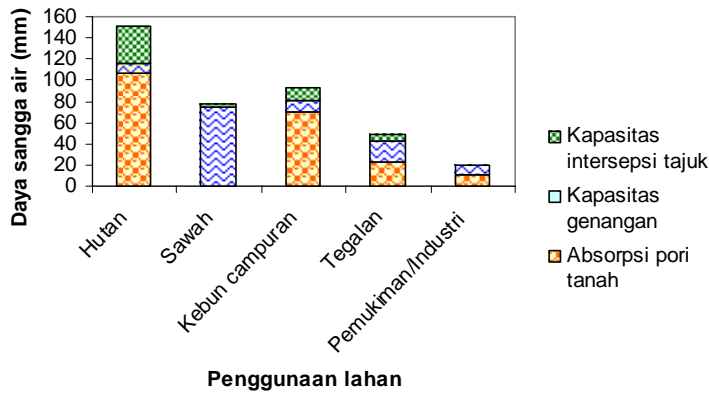
Lahan sawah yang dikelilingi pematang dapat dipandang sebagai kumpulan ribuan dam kecil atau kolam penahan air (*water retention ponds*) yang berguna untuk mitigasi banjir. Air yang ditampung tersebut dialirkan atau dirembeskan secara perlahan ke badan-badan sungai dan daerah hilir sehingga bahaya banjir dapat dikurangi.

Daya sangga air lahan pertanian berbeda-beda tergantung pada berbagai faktor, antara lain porositas tanah, kedalaman perakaran tanaman, kekasaran permukaan tanah, dan daya tahan tajuk tanaman terhadap hujan.

Untuk lahan sawah, daya sangga airnya sangat ditentukan oleh tinggi pematang dan tinggi genangan. Semakin tinggi pematang dan semakin rendah genangan, maka semakin besar daya sangga lahan sawah tersebut terhadap air atau semakin tinggi daya tampung sawah terhadap tambahan air. Hasil penelitian (Nishio, 1999) di Jepang menunjukkan bahwa daya sangga air lahan sawah dengan rata-rata tinggi pematang sekitar 20 cm dan tinggi genangan normal 5 cm adalah 15 cm atau 150 mm. Daya sangga air lahan sawah tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan daya sangga air lahan kering tanaman pangan yang hanya 40 mm dan daya sangga air kebun campuran setinggi 110 mm; namun lebih rendah dibandingkan daya sangga air areal hutan yang besarnya 180 mm. Daya sangga air pada lahan permukiman dan penggunaan lahan lainnya, seperti kawasan industri dan badan jalan, sangat rendah.

Hasil penelitian di Indonesia, khususnya di DAS Citarik (Tala'ohu, 2001) menunjukkan bahwa daya sangga air lahan sawah sekitar 78 mm. Nilai daya

sangga air lahan sawah ini sedikit lebih rendah dari daya sangga air kebun campuran sebesar 92 mm, namun jauh lebih tinggi dari daya sangga air tegalan sebesar 48 mm dan areal permukiman sebesar 20 mm (Gambar 2). Rendahnya daya sangga air lahan sawah di Indonesia (di DAS Citarik) dibandingkan dengan di Jepang disebabkan karena ketinggian pematang lahan sawah di lokasi penelitian di Citarik hanya sekitar 128 mm; jauh lebih rendah dari tinggi pematang di Jepang setinggi 200 mm.



Gambar 2. Daya sangga air lahan sawah dan beberapa tipe penggunaan lahan lainnya di sub-DAS Citarik

Dibandingkan dengan penggunaan lahan lainnya, komponen terbesar daya sangga air lahan sawah adalah karena kapasitas genangan yang tinggi, sedangkan intersepsi kanopinya sangat rendah dan daya absorpsi pori tanahnya terhadap air juga sangat rendah disebabkan adanya lapisan tapak bajak yang rendah daya serap airnya.

Daya sangga air suatu DAS dapat dihitung sebagai perkalian dari daya sangga air masing-masing penggunaan lahan yang ada di dalam DAS dikalikan dengan luas lahan untuk masing-masing penggunaan lahan tersebut. Semakin menyempit areal pertanian, termasuk lahan sawah, dan semakin luas daerah permukiman dan industri, maka semakin kecil daya sangga air DAS tersebut.

Penelitian mengenai pengaruh berbagai bentuk usahatani atau penggunaan lahan terhadap erosi tanah, terutama pada lahan kering, sudah banyak dilakukan, baik melalui pengukuran langsung maupun pendekatan secara modeling. Model USLE (*Universal Soil Loss Equation*; Wischmeier and Smith, 1978) merupakan salah satu pendekatan perkiraan potensi erosi tanah yang paling banyak digunakan. Sutono *et al.* (2003) menggunakan model USLE untuk menduga tingkat erosi tanah di DAS Citarum (Tabel 2). Pendugaan erosi tanah tersebut menggunakan data primer dan data sekunder yang tersedia dan relevan untuk lokasi penelitian. Data tersebut mencakup penggunaan lahan, teknologi pengelolaan usaha tani, kemiringan lahan, erosivitas hujan, dan erodibilitas tanah.

Hasil pendugaan tersebut menunjukkan bahwa sawah adalah salah satu penggunaan lahan yang mempunyai potensi erosi sangat kecil. Sistem teras dengan pematangnya merupakan sistem yang sangat sedikit tererosi. Sebaliknya usaha tani tanaman pangan pada lahan kering berupa rotasi tanaman padi ladang dan palawija, seperti jagung, kacang tanah, kedelai, dan ubi kayu atau usaha tani tanaman sayuran yang umumnya dilakukan pada lahan kering berlereng curam mempunyai potensi erosi paling tinggi. Hal ini disebabkan karena sistem usaha tani tersebut tidak mampu melindungi tanah sepanjang tahun. Sebaliknya erosi tanah pada lahan sawah dan lahan hutan sangat rendah. Vegetasi yang rapat dengan multistrata pada lahan hutan mampu menekan erosi tanah dengan baik.

Tabel 2. Erosi tanah pada berbagai penggunaan lahan di DAS Citarum, Jawa Barat

Penggunaan lahan	Daerah aliran sungai		
	Saguling	Cirata	Jatiluhur
	t ha ⁻¹ tahun ⁻¹		
Hutan	0,1	0,2	0,1
Perkebunan teh	23,0	27,0	10,0
Perkebunan karet	-	9,0	11,0
Sawah	0,3	0,4	1,4
Belukar	1,1	1,6	0,5
Lahan kering pangan	22,0	61,0	40,0

Sumber: Sutono *et al.*, 2003.

Selanjutnya Kundarto *et al.* (2003) melakukan penelitian erosi tanah pada 18 petak sawah di Ungaran, Jawa Tengah dengan ukuran masing-masing petak antara 12 - 360 m² dan luas total petak 2.515 m². Kemiringan makro teras sawah sekitar 22% dan rata-rata perbedaan ketinggian antar petak sawah 73 cm, sedangkan tinggi pematang sawah antara 10 -15 cm. Ringkasan hasil penelitian tersebut disajikan pada Tabel 3.

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa sedimen yang keluar dari 18 petak sawah tersebut hanya sekitar 0,8 - 1,4 t ha⁻¹ musim⁻¹ tanam, sedangkan sedimen

yang berasal dari air irigasi dan memasuki lahan sawah, sebanyak 3,4 - 6,2 t ha⁻¹ musim⁻¹, sebagian besar (2,0 t ha⁻¹ pada musim pertama dan 5,4 t ha⁻¹ pada musim kedua) mengendap pada lahan sawah.

Selain fenomena kecilnya erosi dan besarnya deposisi pada teras sawah, Tabel 3 juga menunjukkan bahwa erosi tanah dalam jumlah yang agak besar, hanya terjadi pada saat pengolahan tanah (pembajakan dan pelumpuran) dan beberapa saat sesudahnya; tetapi sedimen yang terangkut dari satu petak, sebagian besar akan mengendap pada beberapa petak sawah dibawahnya (seperti diperlihatkan juga pada Gambar 3). Erosi total yang keluar dari hamparan lahan sawah relatif kecil, yakni sekitar 2,2 t ha⁻¹ tahun⁻¹ (dalam dua musim tanam). Data ini menunjukkan bahwa sedimen yang mengendap (*deposited sediment*) di petakan lahan sawah jauh lebih besar dibandingkan dengan sedimen yang keluar (*sediment yield*) dari 18 petakan tersebut. Dengan kata lain sawah pada lahan berlereng dapat dianggap sebagai sistem penyaring (*filter system*) sedimen. Sebagai pembanding, sedimen yang terangkut dari tegalan pada lokasi yang berdekatan adalah sekitar 10 - 20 t ha⁻¹ tahun⁻¹ (Agus *et al.*, 2002; Agus dan Wahyunto, 2003).



Gambar 3. Teras sawah yang berfungsi sebagai kumpulan dam kecil mengumpulkan air, juga merupakan filter sedimen. Sedimen hanya tinggi pada saat pengolahan tanah dan beberapa saat sesudahnya pada petak/teras di mana dilakukan pengolahan tanah dan beberapa petak dibawahnya

Tabel 3. Hasil pengamatan erosi tanah pada 18 petak lahan sawah selama dua musim tanam padi

<i>Pengamatan</i>	Musim tanam	
	Pertama 1 Nov'01- 31 Jan'02	Kedua 16 Maret- 30 Juni 02
Total sedimen yang masuk ke petakan sawah melalui air irigasi	864 kg (3,4 t ha ⁻¹)	1.567 kg (6,2 t ha ⁻¹)
Total sedimen yang keluar dari petakan sawah	347 kg (1,4 t ha ⁻¹)	210 kg (0,8 t ha ⁻¹)
Sedimen yang mengendap (terdeposisi) pada petakan	517 kg (2 t ha ⁻¹)	1.357 kg (5,4 t ha ⁻¹)
Sedimen yang terangkut keluar petakan saat pengolahan tanah	181 kg (0,7 t ha ⁻¹)	165 kg (0,6 t ha ⁻¹)

Sumber: Kundarto *et al.* (2003).

Mitigasi peningkatan suhu udara

Suhu udara suatu wilayah yang masih didominasi oleh hamparan lahan sawah yang luas akan relatif lebih sejuk dibanding dengan wilayah lain yang sudah didominasi oleh areal permukiman. Hal ini karena untuk penguapan air dari permukaan sawah diperlukan energi yang diambil dari panas lahan di sekitar sawah tersebut.

Suatu pengukuran suhu udara rata-rata pada siang hari di tiga kota dengan ketinggian yang sama, tetapi penggunaan lahannya berbeda menunjukkan bahwa suhu udara di pusat kota ternyata paling tinggi, sedangkan di wilayah sekitar kebun campuran (*agroforestry*) paling sejuk. Suhu udara di wilayah hamparan padi sawah 2°C lebih rendah daripada di pusat perkotaan (Tabel 4).

Tabel 4. Suhu udara rata-rata di daerah perkotaan, hamparan lahan sawah, dan sekitar kebun campuran di wilayah DAS Citarum, Jawa Barat

Wilayah Kota	Suhu udara (°C) (pukul 11:00 sampai 15:00 WIB)		
	Perkotaan	Lahan sawah	Kebun campuran
Bandung	34	32	na
Cianjur	34	31	28,5
Purwakarta	35	34	29,5

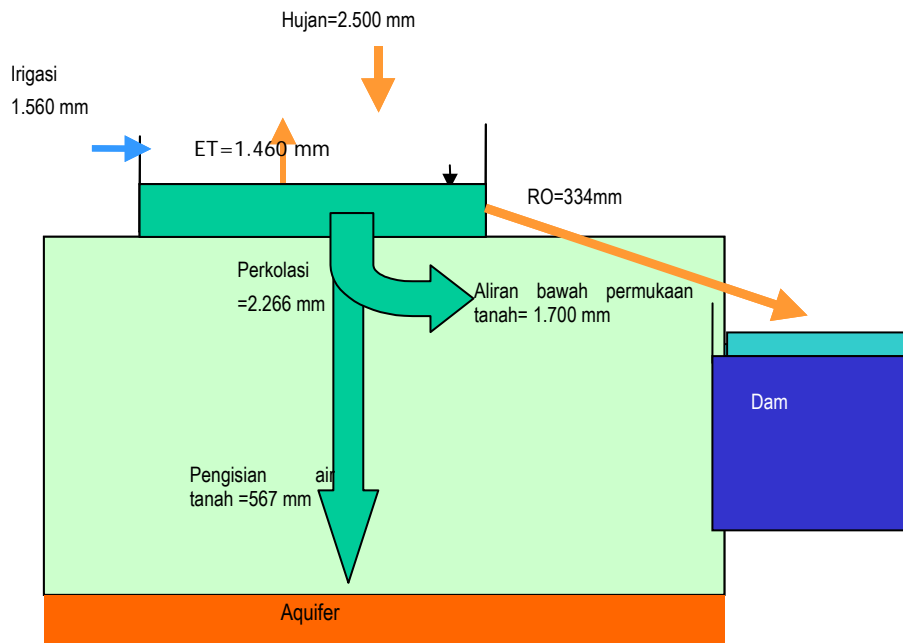
na : data tidak tersedia

Penggunaan alat pendingin suhu udara, seperti *air conditioner* (AC) atau kipas angin oleh penduduk merupakan usaha untuk mengembalikan secara *artificial*

fungsi mitigasi peningkatan suhu udara yang diberikan oleh lahan sawah atau sistem *agroforestry* tersebut.

Pendaur ulang sumber daya air

Berdasarkan konsep neraca air sebagaimana disajikan dalam Gambar 4 dan Tabel 5, lahan sawah menerima air dari curah hujan dan irigasi. Air tersebut kemudian menjelma menjadi air aliran permukaan, menguap melalui proses evaporasi dan transpirasi, dan merembes (perkolasi) ke dalam tanah.



Gambar 4. Skema neraca air tahunan pada lahan sawah (Fagi dan Sanusi, 1983) dan estimasi komponen neraca air untuk DAS Citarum, Jawa Barat (Watung *et al.*, 2003)

Fagi dan Sanusi (1983) memberikan estimasi partisi komponen air hujan dan air irigasi yang diterima lahan sawah dan Watung *et al.* (2003) melakukan kalkulasi partisi tersebut untuk lahan sawah di DAS Citarum. Dari estimasi dan perhitungan tersebut dikemukakan bahwa dari jumlah total pasokan air ke lahan sawah sebesar 4.060 mm tahun⁻¹ yang berasal dari air hujan dan air irigasi, sekitar 2.034 mm (50%) menjelma menjadi air rembesan ke samping dan aliran permukaan yang akhirnya akan sampai ke badan-badan air. Dari air yang merembes ke dalam tanah lahan sawah, sekitar 75% dapat mengalir sebagai

aliran bawah tanah (*subsurface flow*) ke badan air (sungai dan bendungan), sedangkan sebagian lagi (sekitar 25%) akan mengisi ulang (*recharge*) air tanah. Dengan asumsi ini, sekitar 567 mm air perkolasi dapat mengisi air tanah. Air yang menuju *aquifer* dan badan air serta dam dapat didaur ulang untuk berbagai pemanfaatan, baik untuk irigasi, maupun untuk keperluan rumah tangga.

Tabel 5. Neraca air tahunan pada lahan sawah beririgasi di DAS Citarum, Jawa Barat berdasarkan estimasi oleh Watung *et al.* (2003)

Deskripsi	Laju mm hari ⁻¹	Lamanya hari	Jumlah mm tahun ⁻¹
Pasokan air:			
Irigasi (selama musim tanam)	13	120	1.560
Curah hujan			2.500
Total sumber air			4.060
Output/keluaran:			
Perkolasi (air rembesan/resapan)	10,3	220	2.266
-Langsung mencapai badan air (75%)			1.700
-Memasok cadangan air tanah (25%)			567
Aliran permukaan (<i>runoff</i>)			334
Evapotranspirasi	4	365	1.460
Total keluaran			4.060

Penampung limbah organik

Sampah organik yang berasal dari luar pertanian yang mudah terdekomposisi seperti sisa-sisa makanan, kotoran manusia dan sampah kota dapat ditampung oleh lahan pertanian, termasuk sawah dalam bentuk bahan organik, baik bahan organik segar maupun bahan organik yang sudah menjadi kompos. Sawah yang luas di pedesaan mempunyai potensi besar untuk menampung/mendaurulangkan limbah organik. Sebaliknya, di perkotaan, pembuangan sampah merupakan masalah besar. Masalah penumpukan sampah organik di perkotaan selain memerlukan biaya tinggi, juga mencemari lingkungan sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) karena terjadinya penumpukan sampah. Sampah organik yang dikembalikan ke lahan pertanian, termasuk sawah, dapat menyumbangkan unsur hara bagi lahan sawah sehingga kesuburan tanah sawah meningkat. Pemanfaatan fungsi lahan sawah sebagai penampung limbah organik akan dapat direalisasikan apabila sudah dikembangkan budaya pemilahan antara sampah organik yang mudah terdekomposisi (*biodegradable*) dari sampah organik tahan urai (*non-biodegradable*) atau sampah nonorganik.

Pengurang kadar nitrat pada air tanah

Nitrat (NO_3^-) merupakan salah satu bentuk unsur nitrogen yang tersedia di dalam tanah dan bersifat sangat dinamis. Nitrat cepat tercuci ke dalam tanah, terutama pada tanah-tanah yang banyak mempunyai pori drainase atau tanah yang gembur. Pada lingkungan lahan sawah, mineralisasi nitrogen cenderung menghasilkan amonium (NH_4^+), sedangkan kadar nitratnya relatif rendah. Selain itu tanah lahan sawah umumnya mempunyai lapisan tapak bajak yang kedap air sehingga pencucian nitrat ke sumur-sumur di sekitar persawahan relatif lebih rendah dibanding dengan pencucian nitrat ke sumur-sumur di sekitar lahan kering.

Suatu penelitian telah dilakukan dengan mengambil dan menganalisis contoh air dari beberapa sumur di sub-DAS Citarik dan DAS Kaligarang dan hasilnya disajikan pada Tabel 6 (Nursyamsi *et al.*, 2001). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kadar NO_3^- pada air sumur yang berada di lingkungan lahan kering sudah melebihi BML (baku mutu lingkungan) yang direkomendasikan oleh *united states environmental protection agency* (USEPA), yakni maksimum 10 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ (CAST, 1985). Untuk DAS Citarik, nilai tengah konsentrasi nitrat pada air sumur di sekitar tegalan adalah 10,3 mg l^{-1} dan standar deviasi lebih besar dari nilai tengah. Data ini mempunyai makna bahwa variasi kadar nitrat pada air tanah sangat besar dan cukup banyak sumur atau air tanah yang kadar nitratnya jauh di atas nilai ambang batas.

Tabel 6. Kadar nitrat, amonium, dan sulfat air tanah (air sumur) serta standar deviasinya di sekitar lahan pertanian di sub-DAS Citarik dan DAS Kaligarang (Nursyamsi *et al.*, 2001)

DAS dan penggunaan lahan	Nitrat		Amonium		Sulfat	
	mg l^{-1}					
Sub-DAS Citarik:						
Sawah	4,6	± 4,5	3,2	± 5,8	17,6	± 17,9
Tegalan	10,3	± 12,4	0,2	± 0,3	8,4	± 10,3
Kebun campuran	7,8	± 10,9	0,0	± 0,1	1,5	± 1,8
Hutan	0,9	± 0,4	0,2	± 0,3	1,0	± 1,4
Sungai	2,5	± 2,4	1,1	± 1,7	42,9	± 82,3
DAS Kaligarang:						
Sawah	1,1	± 1,4	0,5	± 0,5	8,9	± 15,1
Tegalan	26,5	± 26,8	0,1	± 0,1	5,2	± 4,6
Kebun campuran	8,1	± 5,6	0,1	± 0,1	2,0	± 2,0
Hutan	0,9	± 0,0	0,0	± 0,0	1,3	± 0,0
Sungai	3,9	± 1,4	0,2	± 0,3	3,5	± 3,2

Untuk lokasi studi di DAS Kaligarang, nilai tengah dan standar deviasi air sumur di sekitar lahan tegalan jauh lebih tinggi, dan data ini menunjukkan bahwa hanya sedikit sumur di sekitar tegalan di DAS ini yang kadar nitratnya di bawah

ambang batas. Air minum yang mengandung nitrat di atas BML tersebut sangat berbahaya karena dapat menyebabkan penyakit bayi biru (*blue baby disease*) (Saeni, 1989 dan Flether, 1991).

Kadar nitrat pada air sumur di sekitar persawahan relatif rendah (berada di bawah nilai ambang batas), padahal para petani menggunakan pupuk urea sebagai sumber nitrogen pada lahan sawah intensifikasi dengan takaran yang jauh lebih tinggi mencapai 200 kg urea ha⁻¹ musim⁻¹ tanam dibandingkan takaran pupuk urea pada lahan kering tanaman pangan yang mencapai 100 kg ha⁻¹ musim⁻¹ tanam (Adiningsih *et al.*, 1997). Fakta tersebut menunjukkan bahwa lahan sawah memberikan dampak mengurangi konsentrasi nitrat pada air tanah.

Detoksifikasi kelebihan unsur hara

Nitrogen dan fosfor merupakan dua unsur utama yang menjadi penyebab pendangkalan badan-badan air melalui proses eutrofikasi. Dewasa ini pertanian dipandang sebagai aktivitas yang menjadi penyebab utama eutrofikasi karena petani cenderung menggunakan pupuk N dan P yang berlebihan untuk memperoleh hasil padi yang tinggi.

Namun sesungguhnya lahan sawah mempunyai mekanisme intrinsik untuk menetralkan unsur N dan P yang berlebihan selama musim tanam. Unsur N dalam bentuk amoniak (NH₃) yang berasal dari hasil dekomposisi bahan organik atau penambahan pupuk akan stabil pada tanah dalam keadaan tereduksi. Kemudian pada saat amoniak tersebut teroksidasi, maka unsur N akan berubah dari bentuk amoniak menjadi nitrat yang sebagiannya mudah tercuci ke lapisan reduksi dan hilang ke udara melalui proses denitrifikasi.

Kemampuan lahan sawah dalam mentransformasi dan denitrifikasi unsur N tersebut sangat nyata berbeda dengan lahan kering dimana nitrogen-nitrat tersebut pada lahan kering akan menjadi sumber pencemar utama bagi tanah dan air permukaan (seperti diperlihatkan dalam Tabel 6).

Unsur P akan stabil tersimpan di dalam tanah sawah karena terikat oleh partikel tanah, khususnya dalam lapisan *sub-soil* yang teroksidasi, sehingga tidak mudah tercuci.

Detoksifikasi bahan kimia pertanian

Walaupun zat-zat kimia hidrokarbon berklorine seperti lindin (BHC), *dichlorodiphenyltrichloroetane* (DDT), dan *pentachlorophenol* (PCP) sudah lama dilarang untuk digunakan di sektor pertanian, tetapi bukti empirik menunjukkan bahwa zat-zat tersebut terdekomposisi lebih cepat pada lahan sawah yang tergenang dibanding pada lahan kering (Sethunathan dan Siddaramappa, 1978 dalam Kyuma, 2004). Hal ini mungkin disebabkan proses deklorinasi (pelepasan

klorin) dan dehidroklorinasi dalam keadaan reduksi. Diazinon dan parathion menjadi tidak aktif dalam keadaan terhidrolisis. Demikian juga nitrofen (NIP) dan chlornitrofen (CNP) secara cepat menjadi tidak aktif pada lahan sawah karena proses transformasi reduksi nitrogen dari group nitrat menjadi group amino. Dengan demikian lahan sawah mampu menetralsir sifat racun beberapa unsur kimia sebelum berpengaruh terhadap tempat-tempat lain di hilir sawah.

Namun demikian beberapa bahan kimia pertanian, seperti fenthion (MPP) dan fenobucarb (BPMC), mempunyai paroh waktu (*half life*, $T_{1/2}$) lebih panjang pada lahan sawah dibandingkan dengan di lahan kering, namun untuk bahan agrokimia lain pada umumnya, masa paroh waktunya di lahan sawah lebih pendek.

Penambatan karbon

Bahan organik cenderung terakumulasi lebih banyak pada lahan sawah daripada pada lahan kering. Dikaitkan dengan masalah pemanasan global, fakta tersebut dapat dipandang sebagai kemampuan alami lahan sawah dalam menambat karbon. Kadar C-organik pada lahan sawah biasanya beberapa kali lebih tinggi dibandingkan dengan kadar C-organik lahan kering (Mitsuchi, 1971 *dalam* Kyuma, 2004). Walaupun kecenderungan ini tidak dapat digeneralisasi, namun fakta ilmiah yang dapat diyakini adalah kondisi genangan pada lahan sawah dapat membantu tanah sawah menambat karbon lebih banyak daripada lahan kering.

SIFAT INTRINSIK PELESTARIAN KESUBURAN LAHAN SAWAH

Lahan sawah sudah diusahakan ribuan tahun di kawasan Asia dan mampu mendukung kehidupan manusia yang jumlahnya banyak dengan kepadatan penduduk yang cukup tinggi. Hal ini hanya dimungkinkan karena tingkat produktivitas dan stabilitas sistem lahan sawah yang tinggi. Perilaku dan ketersediaan unsur-unsur hara pada lahan sawah memungkinkan produktivitas lahan sawah tinggi, sedangkan stabilitas lahan sawah lebih didukung oleh karakteristik alaminya berupa sifat-sifat intrinsik lingkungan sebagaimana diuraikan oleh Kyuma (2004) seperti diringkaskan sebagai berikut:

Pemasok unsur hara secara alami

Salah satu sifat intrinsik lingkungan lahan sawah adalah kemampuannya untuk memasok unsur-unsur hara seperti basa-basa (K, Ca, dan Mg), dan silika terlarut secara alami bagi tanaman (padi). Unsur-unsur hara tersebut dipasok melalui air irigasi. Jumlah unsur yang dibawa melalui air irigasi untuk Ca dan Mg seringkali melebihi jumlah yang dibutuhkan tanaman, dan untuk K dan Si, memenuhi sebagian besar kebutuhan tanaman.

Lahan sawah juga mampu memasok unsur nitrogen melalui dekomposisi

bahan organik tanah dan fiksasi melalui proses biologi tanah. Jumlah N yang dapat dijerap melalui fiksasi bisa mencapai 30-40 kg ha⁻¹ musim⁻¹ tanam. Jumlah ini mampu mendukung produksi padi sebanyak 1,5 - 2 t ha⁻¹.

Unsur P dalam tanah sawah lebih mudah tersedia karena proses reduksi dari senyawa besi-fosfat dan kelarutan besi atau aluminium fosfat yang lebih tinggi pada keadaan tanah tereduksi dan pH tinggi. Kemampuan lahan sawah dalam memasok unsur-unsur hara tersebut jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan lahan kering.

Toleran terhadap pengaruh budi daya tanaman monokultur

Walaupun usaha tani padi pada lahan sawah dilakukan tanpa rotasi setiap tahun, tidak ada pengaruh negatif yang nyata sebagaimana akan terjadi pada usaha tani tanaman pangan pada lahan kering. Sistem usaha tani monokultur tanaman pangan pada lahan kering secara terus menerus akan mengakibatkan *tanah sakit* karena terganggunya keseimbangan biologi dan kimianya.

Pergantian keadaan aerobik dan anaerobik pada lahan sawah merupakan salah satu kontrol alami yang efektif mengendalikan keseimbangan biologi dan nonbiologi sehingga tanah sawah *tidak sakit*. Pengalaman praktis di Jepang adalah mengkonversikan usaha tani lahan kering menjadi lahan sawah secara rutin merupakan upaya petani untuk menanggulangi masalah-masalah akibat pertanian monokultur pada lahan kering.

Penanganan gulma relatif lebih mudah

Pengelolaan gulma pada lahan sawah relatif lebih mudah dibanding dengan lahan kering. Pertumbuhan gulma pada lahan sawah yang tergenang relatif terhambat dan biomas gulma pada lahan sawah sekitar sepertiga sampai seperenam dari gulma pada lahan kering. Kalaupun ada beberapa gulma air, pencabutannya akan lebih mudah pada sawah yang tergenang dan berlumpur.

Lagipula, penggenangan dapat memberantas gulma jenis C₄, seperti alang-alang (*Imperata cylindrica*), *Setaria viridis*, *Digitaria adscendence* yang kesemuanya, bila dalam keadaan tidak tergenang, dapat mengalahkan tanaman padi yang merupakan jenis tanaman C₃.

PENGARUH NEGATIF LAHAN SAWAH

Emisi gas rumah kaca

Hasil pengukuran atmosfer menunjukkan bahwa kadar gas rumah kaca (GRK) di udara terus meningkat. Gas rumah kaca tersebut meliputi antara lain karbon dioksida (CO_2), metan (CH_4), nitrogen oksida (N_2O), dan klorofluor-karbon (CFC) yang mampu menyerap panas radiasi gelombang panjang matahari. GRK tersebut menimbulkan fenomena alam yang disebut efek rumah kaca yang berpengaruh terhadap perubahan iklim global (Taylor and MacCracken, 1990).

Emisi gas metan

Metan (CH_4) merupakan GRK kedua setelah CO_2 dalam kaitannya dengan pemanasan global atau efek rumah kaca. Daya pemanasan global satu molekul gas metan di Troposfir sekitar 21 kali lebih tinggi daripada daya pemanasan satu molekul CO_2 . Gas metan akan bertahan di lapisan Troposfir sekitar 7-10 tahun.

Gas metan dihasilkan oleh sekelompok bakteri yang menguraikan bahan organik dalam keadaan anaerobik, misalnya pada lahan sawah, rawa, padang rumput, hutan yang terbakar, dan sebagainya. Lahan rawa dan sawah dipercaya merupakan sumber utama gas metan karena di dalamnya terkandung banyak unsur karbon tanah dan suasananya anaerobik yang mendorong pembentukan gas metan ini.

Pada skala global konsentrasi gas metan meningkat sekitar 1% setiap tahun. Konsentrasi metan dewasa ini di udara setinggi 1,72 ppm (volume) lebih dua kali lipat dari konsentrasi sebelum pra industri yang tingkatnya 0,8 ppm (volume). Lahan basah, termasuk lahan sawah menyumbang sekitar 15 - 45% terhadap kadar metan di atmosfer, sedangkan sumbangan lahan kering sekitar 3 - 10% (Segers and Kenger, 1997).

Produksi (emisi) dan oksidasi metan pada lahan sawah dipengaruhi oleh berbagai mikroorganisme yang aktivitasnya juga dipengaruhi oleh faktor biologi, fisika dan kimia tanah sawah. Rizosfir tanaman padi mempengaruhi produksi dan oksidasi metan. Selama masa pertumbuhan tanaman, fluktuasi air sawah juga mempengaruhi produksi

dan oksidasi metan. Setyanto dan Suharsih (buku ini) menguraikan berbagai aspek tentang emisi gas metan pada lahan sawah.

Emisi gas nitrogen oksida

Selain mengeluarkan gas N_2 (dinitrogen), proses denitrifikasi juga mengeluarkan gas nitrogen oksida (N_2O). Uniknya, gas N_2O juga dihasilkan dalam proses nitrifikasi yang bersifat oksidatif sehingga sumbangan lahan sawah yang berada dalam keadaan reduktif tidak begitu penting dalam emisi gas ini. Bahkan proses yang oksidatif ini lebih penting dalam emisi gas nitrogen oksida. Jika suasana sangat reduktif, bahkan lahan sawah dapat menjadi tempat penyerapan (*sink*) N_2O .

Gas N_2O merupakan gas rumah kaca yang tingkat pemanasan satu molekulnya setara dengan 200-300 kali tingkat pemanasan yang disebabkan oleh CO_2 . Gas ini juga merupakan salah satu penyebab penciutan lapisan ozon di Stratosfir.

Polusi air

Walaupun ada mekanisme detoksifikasi pada lahan sawah, N dan P dari sawah dapat memasuki saluran drainase dan dapat mengalir ke badan air seperti sungai, kolam, dan danau. Proses pengangkutan hara ini terutama terjadi pada musim penanaman karena diperlukan pengeringan (suasana macak-macak) dan adanya pemupukan.

Selain itu, sewaktu pelumpuran dan beberapa saat sesudahnya, lahan sawah bisa menjadi sumber lumpur, namun jumlah total lumpur (sedimen) yang keluar dari lahan sawah, seperti yang tercantum pada Tabel 3, relatif kecil dibandingkan dengan yang berasal dari lahan kering (tegalan).

Konsumsi air yang tinggi

Air merupakan unsur sangat penting pada sistem sawah dan ketersediaan air dalam jumlah tinggi merupakan prasyarat persawahan. Untuk satu musim tanam diperlukan air sebanyak 1.500 mm, walaupun tidak kesemua air ini dimanfaatkan untuk proses evapotranspirasi. Seperti diilustrasikan pada Gambar 4, sebagian air tersebut mengisi cadangan air tanah (*ground water*), serta sebagian lagi merembes kembali ke badan air. Dengan semakin kompetitifnya pengadaan air maka tidak begitu mudah untuk mengadakan air dengan jumlah yang berlimpah tersebut untuk sawah.

Ancaman terhadap kualitas lingkungan lahan sawah

Di samping ancaman alih guna, lahan sawah juga terancam menurun

kualitasnya akibat terkontaminasi berbagai limbah dari kawasan permukiman dan industri yang berada pada areal persawahan. Ada indikasi yang kuat bahwa bahan pewarna dan logam berat yang berasal dari pabrik tekstil mencemari lingkungan persawahan. Wawancara dengan penduduk di sub-DAS Citarik, Kabupaten Bandung, Jawa Barat mengungkapkan bahwa beberapa jenis ikan yang dulunya banyak, sekarang tidak ditemukan lagi di Sungai Citarik dan hal ini dipercayai merupakan dampak dari pencemaran air oleh limbah industri.

Laporan penelitian Adimihardja (2000, tidak dipublikasikan) menyatakan bahwa telah terjadi peningkatan kadar logam berat pada lahan sawah sepanjang Sungai Citarik yang di sekitarnya banyak terdapat pabrik tekstil. Berdasarkan laporan tersebut, Suganda *et al.* (2003) meneliti luas lahan sawah yang sudah tercemar, kadar logam berat di dalam tanah dan di dalam jaringan tanaman. Contoh tanah dan air diambil dari lokasi dekat pabrik tekstil sampai jarak 2 km ke arah hilir, serta dari sebelah kanan dan kiri sungai pada jarak 0,5 km.

Hasil analisis contoh air dari sumur penduduk dan air sungai tidak menunjukkan adanya peningkatan kadar logam berat, tetapi petani setempat menyatakan bahwa warna air sungai dan air sawah yang berdekatan dengan pabrik sering berubah dari jernih menjadi kehitam-hitaman atau kemerah-merahan. Pernyataan petani tersebut ditunjang dengan pengamatan di lapangan seperti ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Limbah pada salah satu bak penjernihan air (*water purification pond*) (gambar kiri) dan warna air pada lahan sawah yang berdekatan dengan salah satu pabrik tekstil (gambar kanan) di DAS Citarum, Jawa Barat

Analisis kimia menunjukkan bahwa kadar Cu, Zn dan Co pada tanah sawah di sekitar pabrik tekstil di Citarik sudah mencapai titik kritis atau BML (Tabel 7). Namun

demikian kadar logam berat pada contoh tanaman masih lebih rendah dari BML, kecuali untuk kadar Zn yang telah melewati ambang batas tidak aman bagi konsumsi manusia dan ternak (Tabel 8).

Mengingat adanya indikasi meningkatnya kadar logam berat, maka diperlukan upaya deliniasi lahan sawah di sekitar pabrik berdasarkan tingkat pencemarannya. Sawah yang tanahnya mengandung logam berat di atas BML akan mengancam keamanan pangan (*food safety*) dan karena itu diperlukan langkah-langkah kebijakan untuk penanganannya seperti penggunaan lahan untuk pertanian non pangan (tanaman hias atau serat), dan perumusan kompensasi bagi petani yang tanah sawahnya tercemar.

Tabel 7. Kadar logam berat pada tanah sawah di sekitar pabrik tekstil di Rancaekek, Kabupaten Bandung, Jawa Barat

Logam berat	Kadar (kisaran)		BML pada tanah
	Minimum	Maksimum	
	mg kg ⁻¹		
Cu	43	83	60-125
Zn	57	137	70-400
Pb	8	23	100-400
Cd	0,05	0,19	3-8
Co	14	27	25-50
Cr	0,8	25	75-100
Ni	14	21	-

Sumber: Suganda *et al.* (2003)
BML = Batas minimum lingkungan.

Tabel 8. Kisaran kadar logam berat pada jerami padi dan beras yang berasal dari sawah di sekitar pabrik tekstil di Rancaekek, Kabupaten Bandung, Jawa Barat

Logam berat	Kadar (kisaran)		BML pada tanaman
	Jerami	Beras	
	mg kg ⁻¹		
Cu	2-13	2-7	20-100
Zn	17-64	14-23	10-400
Pb	0,971-5,384	0,092-0,918	50-300
Cd	0,029-0,351	0,026-0,180	5-30
Co	0,108-5,917	0,111-4,157	15-30
Cr	0,673-4,521	0,985-17,110	-
Ni	0,437-15,864	0,609-43,072	5-30

Sumber: Suganda *et al.* (2003)
BML = Batas minimum lingkungan.

PENUTUP

Ditinjau dari aspek lingkungan, lahan sawah mempunyai arti penting karena menyumbangkan jasa lingkungan (mempunyai multifungsi) dalam bentuk mitigasi banjir, pengendalian erosi dan sedimentasi, pendaur ulang sumber daya air, mitigasi peningkatan suhu udara, penampung atau pendaur ulang limbah organik, pengurang kadar nitrat pada air tanah, detoksifikasi kelebihan unsur hara dan residu pestisida sehingga tidak mencemari lingkungan, serta penambat karbon. Selain menyumbangkan jasa lingkungan, lahan sawah telah mampu mendukung ketahanan pangan selama ribuan tahun. Hal ini disebabkan berbagai sifat intrinsik pelestarian yang dipunyainya antara lain pemasok unsur hara secara alami (terutama untuk lahan sawah beririgasi), toleran terhadap sistem pertanian monokultur, dan lebih mudahnya penanganan gulma.

Walaupun mempunyai banyak aspek positif, lahan sawah juga mempunyai beberapa pengaruh negatif terhadap lingkungan, antara lain emisi gas rumah kaca, terutama gas metan, polusi air oleh hara dan sedimen pada awal musim tanam, serta tingginya kebutuhan air untuk sistem sawah.

Alih guna lahan sawah menjadi lahan nonpertanian, seperti kawasan permukiman dan industri, menyebabkan berbagai jasa lingkungan yang dapat disumbangkan lahan sawah, secara total atau parsial, menjadi hilang tanpa dapat dipulihkan (*irreversible*). Selain itu, alih guna sebagian lahan sawah menyebabkan terjadinya ancaman kualitas lingkungan pada lahan sawah yang tersisa. Ancaman tersebut terutama ditimbulkan oleh berbagai limbah kimia yang berasal dari berbagai jenis kegiatan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiningsih, J.S., T. Prihatini, J. Purwani, and A. Kentjanasari. 1997. Development of integrated fertilizer management to sustain food crop production in Indonesia: The use of organic and biofertilizers. *Indonesian Agric. Reserach and Dev. Journal* 19: 57-66.
- Agus, F. and Wahyunto. 2003. Evaluation of flood mitigation function of several land use systems in selected areas of West Java, Indonesia. Paper presented at Japan/OECD Expert Meeting on Land Conservation Indicators, 13-15 May, 2003, Kyoto, Japan.
- Agus, F., U. Kurnia, and A.R. Nurmanaf (*Eds.*). 2001. Proceedings, National Seminar on the Multifunction of Paddy Fields. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor, Indonesia. 147 p.
- Agus, F., Wahyunto, and S. H. Tala'ohu. 2002. Multifunctional roles of paddy fields

in case watersheds in Java, Indonesia. Presented at the Working Group Meeting of the ASEAN-Japan Project on Multifunctionality of Paddy Farming and Its Effects in ASEAN Countries, 27 February-1 March 2002, Kuala Lumpur, Malaysia.

Biro Pusat Statistik. 2003. Statistik Indonesia. BPS. Jakarta.

CAST (*Council for Agricultural Sciences and Technology*). 1985. Agricultural and Groundwater Quality. Rep. 103. CAST, Ames, IA.

Fagi, A.M. dan S.A. Sanusi. 1983. Meningkatkan efisiensi air irigasi dengan teknik budidaya tanaman dan teknik pengairan. Kumpulan makalah Lokakarya Penelitian Padi. Cibogo, Bogor 22-24 Maret 1983. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor.

Fletcher, D. 1991. A. National perspective. pp. 9-17. *In* R.F. Follet, D.R. Keeney, and R.M. Cruse (*Eds.*) Managing Nitrogen for Ground Water Quality and Farm Profitability. Soil Science Soc. of America, Madison, Wisconsin.

Irawan, B., S. Friyatno, A. Supriyatna, I.S. Anugrah, N.A. Kitom, B. Rachman, dan B. Wiryono. 2001. Perumusan Modal Kelembagaan Konservasi Lahan Pertanian. Pusat Penelitian Sosial Ekonomi Pertanian, Bogor.

Kundarto, M., F. Agus, A. Maas, dan B.H. Sunarminto. 2003. Neraca air, erosi tanah, dan transpor lateral hara NPK pada sistem persawahan di Sub DAS Kali Babon, Semarang. hlm. 223-238. *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian. Bogor, 2 Oktober dan Jakarta, 25 Oktober 2002. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Kyuma, K. 2004. Paddy Soil Science. Kyoto University Press and Trans Pacific Press. 280 p.

Nishio, M. 1999. Multifunction Character of Paddy Farming. Second Group Meeting on the Interchange of Agricultural Technology Information between ASEAN Member Countries and Japan, 16-18 February, 1999, Jakarta.

Nursyamsi, D., Sulaeman, M.E. Suryadi, dan F.G. Berelaka. 2001. Kandungan beberapa ion di dalam sumber air di Sub DAS Citarik dan DAS Kaligarang. hlm. 103-109 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah. Bogor, 1 Mei 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Saeni, M.S. 1989. Kimia Lingkungan. Pusat Antar Universitas (PAU) Ilmu Hayat. Institut Pertanian Bogor, Bogor. 151 hlm.

- Segers, R. and S.W.M. Kenger. 1997. Methane production as a function of anaerobic carbon mineralization: A process model. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 1.107-1.117.
- Setyanto, P., A.B. Rosenani, A.K. Makarim, I. Che Fauziah, A. Bidin, dan Suharsih. 2002. Soil controlling factors of methane gas production from flooded rice fields in Pati District, Central Java. *Indonesian Journal of Agricultural Science* 3 (1): 1-11.
- Suganda, H., D. Setyorini, H. Kusnadi, I. Saripin, dan U. Kurnia. 2003. Evaluasi pencemaran limbah industri tekstil untuk kelestarian lahan sawah. hlm. 203-221 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian. Bogor, 2 Oktober dan Jakarta, 25 Oktober 2002. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Sumaryanto, S. Friyatno, dan B. Irawan. 2001. Konversi lahan sawah ke penggunaan nonpertanian dan dampak negatifnya. hlm. 1-18 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah. Bogor, 1 Mei 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Sutono, S., S.H. Tala'ohu, O. Sopandi, dan F. Agus. 2003. Erosi pada berbagai penggunaan lahan di DAS Citarum. hlm. 113-133 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Tala'ohu, S.H., F. Agus, dan G. Irianto. 2001. Hubungan perubahan penggunaan lahan dengan daya sangga air Sub DAS Citarik dan DAS Kaligarang. hlm. 93-102 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah. Bogor, 1 Mei 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor. (In Indonesian).
- Taylor, K.E. and M.C. MacCracken. 1990. Projected effect of increasing concentrations of carbon dioxide and trace gases on climate. p.1-17. *In* B.A. Kimball, N.J. Rosenberg, L.H. Allen, Jr., G.H. Heichel, C.W. Stuber, D.E. Kissel and S. Ernst. *Impact of Carbon Dioxide, Trace Gases, and Climate Change on Global Agriculture*. American Society of Agronomy, Inc. Madison, USA. 133 p.
- Wahyunto, Zainal Abidin, M., Priyono, A., and Sunaryo. 2001. Studi perubahan penggunaan lahan di Sub DAS Citarik, Jawa Barat dan DAS Kaligarang, Jawa Tengah. Hal. 39-63. *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah, Bogor, 1 Mei 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Watung, R.L., S.H. Tala'ohu, dan F. Agus. 2002. Fungsi lahan sawah dalam

preservasi air. Hal. 149-157. *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith 1978. Predicting rainfall erosion losses, A guide to conservation planning. USDA. Agric. Handbook. 537. Washington DC.