ISBN: 978-979-1159-78-4978

Adagium

Ilmu Tanah dan Tanaman dalam Praktek Pertanian Tanaman Pangan

Ilmu tanah dan fisiologi tanaman ditulis oleh para ahlinya dalam buku-buku yang terpisah. Berbagai versi diuraikan dalam buku tersebut.

Buku ini menyelaraskan keterkaitan antara ilmu tanah dan fisiologi tanaman. Uraian penyelarasan isi buku dari sisi ilmu tanah adalah fabrikasi berbagai jenis pupuk, karakteristik dan reaksinya di dalam tanah; dari sisi fisiologi tanaman adalah mekanisme jerapan unsur hara tanah, fungsi dari masing-masing unsur hara bagi metabolisme tanaman.

Efisiensi penggunaan pupuk dipertimbangkan dari keseimbangan antara ketersediaan unsur hara dan kebutuhan tanaman. Pupuk diberikan apabila ada ketidakseimbangan.

Teknologi pada hakekatnya bertujuan untuk memodifikasi karakteristik fisik, kimia dan biologi tanah agar unsur hara lebih tersedia dan efisiensi unsur hara naik, dan tepat waktu tanam untuk memanfaatkan energi matahari secara optimum, dan menghindar dari cekaman kekurangan air.

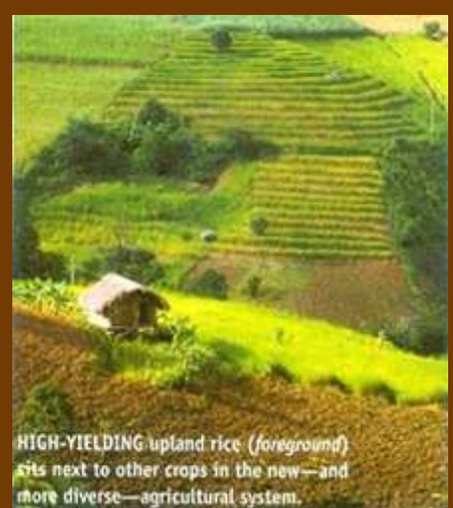
Aspek ekonomi dan agronomis dari pemupukan diuraikan dengan rumus agronomis dan ekonomis.

Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan
Jl. Merdeka No. 147, Bogor 16111
Telp.: (0251) 8334089, 8344620, Faks.: (0251) 8312755
website: www.pangan.litbang.pertanian.go.id
email: puslitbangtan@litbang.pertanian.go.id

Adagium: Ilmu Tanah dan Tanaman dalam Praktek Pertanian Tanaman Pangan

Adagium

Ilmu Tanah dan Tanaman Dalam Praktek Pertanian Tanaman Pangan



HIGH-YIELDING upland rice (*foreground*) sits next to other crops in the new—and more diverse—agricultural system.

Achmad M. Fagi
A. Karim Makarim
Haris Syahbuddin

Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan
Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Kementerian Pertanian
2020

Adagium

ILMU TANAH DAN TANAMAN DALAM PRAKTEK PERTANIAN TANAMAN PANGAN

Achmad M. Fagi
A.Karim Makarim
Haris Syahbuddin

100 tahun

dari Algemeen Proefstation voor de Landbouw 1918
ke Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan 2018

Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan
Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Kementerian Pertanian
2020

Adagium
Ilmu Tanah dan Tanaman dalam Praktek Pertanian Tanaman Pangan
@2020

Hak cipta dilindungi Undang-undang ada pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Hak Penerbitan ada pada Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh isi buku ini dengan cara apapun tanpa izin dari Penerbit.

Penulis:
Achmad M. Fagi
A. Karim Makarim
Haris Syahbuddin

Editor :
Mahyuddin Syam
Hermanto

Cetakan 1, Mei 2020
ISBN: 978-979-1159-78-4

Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan
Jl. Merdeka No 147, Bogor 16111
Telp. (0251) 8334089, 8334620; Faks (0251) 8312755
Email: puslitbangtan@litbang.pertanian.go.id

PRAKATA

Buku tentang tanah dan fisiologi tanaman untuk pertanian telah banyak ditulis oleh para ahli ilmu tanah dan ahli fisiologi tanaman bertaraf internasional. Isi dari buku-buku ilmu tanah dan juga buku-buku fisiologi tanaman bervariasi dalam hal tekanan terhadap objek bahasan, bergantung kepada daya tarik dari para ahli tersebut. Tetapi kalau dibaca secara seksama isi dari buku-buku dalam disiplin ilmu yang sama saling melengkapi antara satu dan lainnya. Untuk menelaah isi dari buku-buku itu yang terdiri atas ratusan halaman per buku atau ribuan halaman secara keseluruhan perlu waktu yang tidak mungkin diluangkan oleh teknisi di lapang (Penyuluh Pertanian Spesialis-PPS, Penyuluh Pertanian Lapang-PPL), bahkan oleh mahasiswa dan peneliti sekalipun, apalagi oleh para pengambil keputusan yang kegiatan kesehariannya begitu banyak dan kompleks.

Buku-buku ilmu tanah dan fisiologi tanaman dasar ditulis oleh para ahli pada era dimana isu-isu terkini belum timbul, karena pada saat itu hasil-hasil pertanian relatif masih dapat mencukupi kebutuhan minimal, sementara sejak pertengahan abad ke-20, mulai disadari bahwa pertambahan jumlah penduduk membutuhkan pangan dan papan yang semakin banyak, dan kelestaran lingkungan semakin mengkhawatirkan akibat dari tekanan jumlah penduduk itu. Pada situasi seperti dewasa ini wajar kalau muncul dua pilihan gagasan atau strategi tentang pembangunan pertanian: pertama, gagasan *low-inputs traditional farming* untuk kembali ke penerapan teknologi seperti pada era pra-industri; kedua, gagasan *high inputs commercial farming* yang lebih memperhatikan kebutuhan pangan dan papan penduduk yang terus meningkat. Pada tanaman pangan terigu, jagung dan padi alternatif/gagasan kedua berkonotasi dengan teknologi Revolusi Hijau.

Ilmuwan di negara-negara maju yang diawali oleh ilmuwan Amerika Serikat dan Australia mengembangkan teknologi yang disebut *precision farming* dan *prescription farming*. Di Indonesia,

dinamakan teknologi pertanian spesifik lokasi. Akan tetapi, di Indonesia spesifik lokasi itu diinterpretasikan sempit, yaitu desa, kecamatan atau kabupaten, bukan agroekosistem. Data desa, kecamatan dan kabupaten dimana penelitian/pengkajian diselenggarakan tidak dapat digunakan untuk memformulasi *precision farming* atau *prescription farming*.

Perlu dimaklumi bahwa teknologi inovatif, terutama yang berkenaan dengan komoditas populis seperti padi, jagung dan kedelai tidak dapat dikembangkan secara instan. Sebagai contoh, ada kesepakatan internasional bahwa teknologi yang dilaporkan adaptif terhadap perubahan iklim dan mampu menekan emisi gas rumah kaca (GRK) harus memenuhi 3 syarat, yaitu *reportable* (dapat dilaporkan secara bertanggungjawab kebenarannya); *verifiable* (dapat diuji keabsahan ilmiahnya); dan *multiplicable* (dapat diterapkan secara luas dan hasilnya konsisten). Peraturan Presiden (Perpres No. 61/2011) menekankan bahwa teknologi yang adaptif terhadap perubahan iklim dapat dianjurkan, tetapi tidak boleh menurunkan laju kenaikan produksi pertanian. Ini adalah syarat yang menantang para peneliti.

Dengan buku ini penulis berupaya untuk memfasilitasi para pihak yang bertanggung jawab dalam pembangunan pertanian berkaitan dengan pengembangan dan penggunaan teknologi pertanian yang efektif, efisien dan ramah lingkungan. Melalui buku ini diharapkan masalah-masalah produktivitas, stabilitas, keberlanjutan laju kenaikan hasil pertanian, terutama isu tentang penggunaan pupuk anorganik dan organik secara berimbang diatasi secara jernih yang berlandaskan ilmu pengetahuan dan teknologi. Kesesuaian lahan untuk berbagai komoditas pertanian adalah hasil interaksi antara tanah, iklim dan tanaman.

Saran-saran yang membangun penulis terima dengan terbuka dan senang hati. Semoga bermanfaat.

Penulis

SAMBUTAN
KEPALA BADAN LITBANG PERTANIAN

Pemerintah cq Kementeraian Pertanian menerapkan pendekatan intensifikasi, ekstensifikasi, rehabilitasi dan diversifikasi dalam upaya untuk mencapai kemandirian dan kedaulatan pangan. Upaya ini diawali dengan program intensifikasi produksi padi yang dikawal secara masif.

Bersamaan dengan program intensifikasi tersebut diproyeksikan rehabilitasi jaringan irigasi lama yang mencakup lahan sawah seluas 2,32 juta ha dan pembangunan jaringan irigasi baru yang ditargetkan mampu mengairi lahan sawah bukaan baru seluas 1,34 juta ha. Selain itu diproyeksikan juga pembangunan bendungan/waduk baru untuk meningkatkan area tanam dan area panen padi, jagung, kedelai dan tanaman pangan lain pada pola tanam berbasis tanaman padi. Ketersediaan air untuk lahan sawah tadah hujan akan lebih terjamin dan peluang untuk dikonversi menjadi lahan sawah irigasi non-teknis atau setengah teknis cukup besar dengan dibangunnya 30.000 embung atau tandon air (*small farm reservoir*).

Program intensifikasi dan segala kemudahannya berupa subsidi sarana produksi menuntut penggunaan teknik budidaya yang efektif dan efisien, karena hal ini berarti efisiensi anggaran untuk memperluas subsidi ke lahan sawah bukaan baru bersamaan dengan pembangunan infrastruktur ekonominya.

Program intensifikasi, ekstensifikasi dan diversifikasi usahatani menghadapi keanekaragaman ekosistem yang utamanya berupa jenis tanah dan iklim/cuaca. Kondisi biofisik dan kimia tanah relatif lebih mudah dimodifikasi dengan pemupukan anorganik dan organik yang berimbang dengan ketersediaan hara tanah dan fisik tanah. Pupuk anorganik untuk program

intensifikasi tanaman pangan disubsidi oleh pemerintah, sebab itu penggunaannya harus efektif dan efisien. Iklim/cuaca yang berpengaruh langsung terhadap proses fotosintesis dan respirasi tanaman mebutuhkan dukungan unsur hara dari tanah. Maka, harus ada keserasian pengelolaan tanah dan tanaman yang oleh penulis diekspresikan dalam istilah adagium tanah dan tanaman, judul dari buku.

Buku kedua ini diterbitkan dalam rangka peringatan 100 tahun Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Buku yang ditulis oleh Dr. Achmad M. Fagi dkk diharapkan dapat membuka cakrawala berpikir dari penyuluh pertanian, peneliti dan lainnya untuk memanfaatkan fasilitas dan data yang dihasilkan dalam mewujudkan teknologi pertanian spesifik lokasi dalam arti yang sebenarnya.

Semoga buku ini bermanfaat bagi pengembangan teknologi pertanian moderen (teknologi pertanian 4,0).

Jakarta, ….. April 2020

Dr. Ir. Fadjry Djufry, M.Si

DAFTAR ISI

PRAKATA iii
SAMBUTAN KEPALA BADAN LITBANG PERTANIAN..... v
I. PENDAHULUAN 1
II. ISU-ISU DALAM PRAKTEK PEMBANGUNAN PERTANIAN..... 5
Dua Makna Sustainability 6
Senjang Hasil..... 8
Kontroversi Pertanian Organik..... 11
Efisiensi Penggunaan Pupuk 15
III. TELAAH POPULER TANAH PERTANIAN 19
Tanah dan Faktor Pembentuknya..... 19
1. Tubuh tanah..... 21
2. Bahan induk 23
3. Relief..... 24
4. Iklim 25
Penciri Kesesuaian Lahan Pertanian..... 25
1. Curah hujan..... 29
2. Drainase internal tanah 30
3. Kedalaman lapisan olah 30
4. Tekstur 32
5. Kapasitas Tukar Kation 36
6. pH tanah 45
7. Unsur hara penting bagi tanaman 47
8. Salinitas..... 51
9. Kemiringan lahan..... 53
Sintesis..... 55
IV. KLASIFIKASI JENIS TANAH..... 59
Klasifikasi dengan Metode Lama..... 61
Klasifikasi dengan Metode Baru..... 65
Tanah Sawah 69
1. Toposequen lahan sawah dan pengaruhnya..... 69
2. Morfologi tanah sawah..... 70

3. Klasifikasi jenis tanah sawah 71
4. Regim air petak pertanaman padi sawah irigasi 73
5. Bahan organik pada sawah jenuh air..... 77
Tanah Sawah pada Rawa Pasang Surut 78
1. Tipe luapan..... 78
2. Tipologi lahan 79
3. Pembentukan dan oksidasi pirit..... 83
Tanah Sawah pada Rawa Lebak..... 84
1. Tipologi..... 84
2. Teknik budidaya..... 85
Tanah pada Lahan Tadah Hujan 89
1. Lahan tadah hujan basah..... 90
2. Lahan tadah hujan kering 91
Contoh Interpretasi Data Karakteristik Tanah dan Kegunaannya 92
Sintesis..... 93
1. Struktur tanah..... 93
2. Emisi gas rumah kaca 94
3. Kualitas lumpur..... 95
4. *Agroecosystem properties* dari lima lahan pertanaman padi..... 97
5. Konsekuensi gangguan terhadap kondisi keseimbangan (equilibrium) hutan hujan tropis 99
V. STRATEGI PENINGKATAN EFISIENSI PENGGUNAAN SARANA PRODUKSI PERTANIAN 101
Persepsi Upaya Peningkatan Efisiensi 102
Gagasan ilmiah Peningkatan Efisiensi..... 104
1. Analisis pertumbuhan tanaman..... 104
2. Beberapa rumus pertumbuhan tanaman yang ditawarkan 104
3. Konsep mobilitas unsur hara Bray..... 107
4. Konsep Baule unit dalam perhitungan kebutuhan pupuk..... 107
5. Pemupukan berimbang 109

Interaksi Komplementer Antar Komponen Teknologi 113
1. Rintisan ide 113
2. Metode studi senjang hasil skala mikro 114
3. Evalusi senjang hasil lintas provinsi atau lintas kabupaten dalam provinsi 116
Site Specific Nutrient Management 118
Sintesis 123
VI. JENIS PUPUK UNTUK PERTANIAN DI DAERAH TROPIKA 125
Jenis Pupuk Populer dan Prospektif 126
1. Urea 126
2. Amonium sulfat 128
3. Amonium nitrat 130
4. Kalium nitrat 132
5. Amonium fosfat 133
6. Kapur nitrat 134
7. Soda nitrat 137
8. Kalium klorida 138
9. Kalium sulfat 140
10. Superfosfat 141
11. Triple superphosphate 144
12. Dicalcium phosphate 146
13. Kalium sianamida 147
14. Basic slag 149
15. Fosfat alam 150
16. Phospal 153
Deskripsi Standar Pupuk dalam Pasar Internasional 154
Faktor Konversi Unsur Hara dari Pupuk dan Istilah dalam Pemupukan 156
1. Faktor konversi unsur hara 156
2. Kehalusan butiran pupuk 158
3. Higroskopisitas 158
4. Indeks kegaraman 161
5. Aksidifikasi atau netralisasi 161
Sintesis 162

VII. MEKANISME JERAPAN HARA OLEH TANAMAN 164
Hipotesis dan Teori tentang Jerapan Hara 164
1. Jerapan pasif 165
2. Jerapan aktif 168
Faktor yang Berpengaruh terhadap Jerapan Hara 170
1. Suhu 171
2. Konsentrasi ion hidrogen 171
3. Cahaya matahari 171
4. Tekanan oksigen 171
5. Interaksi antar unsur hara 172
6. Pertumbuhan tanaman 172
Fungsi Unsur Hara Bagi Pertumbuhan Tanaman 172
1. Nitrogen 175
2. Fosfor 175
3. Kalium 175
4. Kalsium 176
5. Magnesium 176
6. Sulfur 177
7. Besi 177
8. Mangan 178
9. Tembaga 178
10. Seng 178
11. Boron 179
12. Molibdin 180
Sintesis 180
Jenis unsur hara penting tambahan 188
13. Natrium 181
14. Silika 181
15. Klor 181
16. Selenium 182
pH tanah dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman 182
Perhitungan keuntungan dari pemupukan yang efektif dan efisien 184

VIII. MODEL HUBUNGAN TANAH DAN TANAMAN 191
Hasil Potensial 193
Fotosintesis Bersih 194
1. Partisi biomas tanaman 194
2. Keterkaitan pertumbuhan daun 196
3. Pengaruh waktu tanam (kondisi iklim) terhadap potensi hasil tanaman 196
4. Pengaruh kenaikan suhu udara terhadap potensi hasil tanaman 197
Hasil Tanaman Akibat Berbagai Cekaman 198
1. Dinamika air dan cekaman kekurangan air 199
2. Dinamika hara dalam Sistem Tanah-Tanaman 201
Hara dalam Sistem Tanah 202
Hara dalam Sistem Tanaman 203
1. Kebutuhan hara N, P, dan K 203
2. Konsep pemupukan berimbang 204
IX. UJI TANAH 207
Pedoman Umum 207
1. Fungsi uji tanah 207
2. Penanganan uji tanah secara massal 207
3. Contoh tanah untuk uji tanah dalam hamparan lahan .. 208
4. Informasi tentang lokasi sasaran 208
5. Ekstraktan untuk uji tanah 208
6. Interpretasi hasil uji tanah 209
Kebutuhan Kapur 210
X. PENUTUP 213
GLOSARIUM 215
DAFTAR PUSTAKA 229
LAMPIRAN 239
INDEKS 249

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perbandingan komponen teknologi PTT, SRI (Indonesia) dan SRI Mandagaskar 3
Tabel 2. Tingkat masukan dan keluaran dalam sistem produksi pertanian pangan kaitannya dengan ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan serta konsekuensinya. 7
Tabel 3. Kandungan hara makro dari beberapa bahan organik 14
Tabel 4. Contoh kesesuaian lahan untuk padi sawah 27
Tabel 5. Contoh kesesuaian lahan untuk kedelai..... 28
Tabel 6. Nilai KTK dari humus dan mineral liat 2:1 dan 1:1 44
Tabel 7. Unsur hara makro dan mikro, sumber dan bentuknya (anion/kation) yang dijerap oleh tanaman.. 48
Tabel 8. Garis besar analisis parameter karakteristik tanah.. 50
Tabel 9. SUT konservasi pada berbagai kombinasi kemiringan (lereng), kedalaman solum dan erodibilitas tanah..... 54
Tabel 10. Perbandingan indeks hasil biji/gabah pada berbagai kandungan liat untuk dipertimbangkan dalam pola tanam padi-kedelai.. 57
Tabel 11. Karakteristik dari penciri masing-masing katagori dalam mengklasifikasi jenis tanah di Amerika Serikat.. . 66
Tabel 12. Ordo tanah dan kunci indikator utama (dilengkapi elemen pembentukan)..... 67
Tabel 13. Klasifikasi jenis tanah sawah dengan metode baru disandingkan dengan klasifikasi jenis tanah dengan metode baru..... 72
Tabel 14. Tipologi lahan pada berbagai klasifikasi dari tanah sawah rawa pasang-surut..... 80
Tabel 15. Ciri-ciri dari tanah mineral dan tanah bergambut pada lahan rawa lebak. 85
Tabel 16. Hasil gabah 3 varietas padi unggul pada lebak dangkal, tengahan dan dalam..... 86

Tabel 17. Anjuran ameliorasi dan pemupukan pada berbagai sistem budidaya di rawa lebak.. 87
Tabel 18. Contoh data analisis tanah dan penggunaannya dalam praktek pertanian..... 88
Tabel 19. *Agroecosystem properties* dari lima lahan pertanaman padi dan penyebabnya..... 98
Tabel 20. Penambahan jumlah unit faktor pertumbuhan menurunkan hasil dan kenaikan hasil..... 106
Tabel 21. Penelitian senjang hasil dengan perlakuan faktorial lengkap..... 114
Tabel 22. Senjang hasil padi rata-rata propinsi. 116
Tabel 23. Jenis pupuk di pasar internasional : rumus kimia, kandungan hara dan berat jenis..... 154
Tabel 24. Faktor konversi unsur hara dari pupuk dan sebaliknya.. 156
Tabel 25. Ukuran (nomor) saringan dan bukaan (diameter lubang saringan)... 158
Tabel 26. Batas kelembaban maksimum dimana pupuk mulai menyerap uap air kalau kelembaban udara lebih tinggi.. 159
Tabel 27. Higroskopisitas dari beberapa pupuk campuran.. 160
Tabel 28. Indeks keragaman beberapa jenis pupuk..... 161
Tabel 29. Kemampuan aksidifikasi atau netralisasi beberapa jenis pupuk.. 162
Tabel 30. Tanda-tanda dari defisiensi unsur hara pada bagian untaian daun..... 173
Tabel 31. Kebutuhan kapur (ton/ha) untuk menaikkan pH tanah mencapai 6,5. 212

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Ilustrasi perbedaan dua ciri dari agroekosistem 9
(dimodifikasi dari sumbernya)

Gambar 2. Konseptualisasi senjang hasil dan faktor-faktor penyebabnya 10

Gambar 3. Pergerakan dan ketersediaan hara K tanah dalam budidaya tanaman..... 12

Gambar 4. Kurva tanggap (respon) tanaman terhadap penambahan unsur hara..... 16

Gambar 5. Ilustrasi keserasian (*compatibility*) antara EPUH (Efisiensi Penggunaan Unsur Hara) dengan EPL (Efisiensi Penggunaan Lahan). 17

Gambar 6. Diagram faktor-faktor pembentuk tanah..... 20

Gambar 7. Ilustrasi tubuh tanah dan bagian penanda/ spesifikasinya..... 22

Gambar 8. Klasifikasi butiran (partikel) tanah berdasarkan ukuran dari 3 sistem..... 33

Gambar 9. Distribusi presentase kandungan liat, debu dan pasir dalam tanah sebagai indikator dari tekstur tanah..... 34

Gambar 10. Kisaran tingkat pH tanah mineral yang umum dijumpai pada wilayah iklim basah dan kering 46

Gambar 11. Luas lahan pertanian produktif makin berkurang, upaya untuk meningkatkan hasil melalui program ekstensifikasi ke lahan yang kurang subur dengan teknologi intensif agar hasilnya setara dengan hasil pada lahan produktif (subur) akan menghasilkan B/C ratio <1. 56

Gambar 12. Ilustrasi pengaruh toposequen dan kedalaman muka air tanah terhadap profil tanah sawah.. 70

Gambar 13. Transformasi pupuk N menjadi gas NH_3 dan NH_4^+ menjadi NO_3^- di lapisan oksidasi (nitrifikasi) dan NO_3^- menjadi N_2O dan N_2 di lapisan reduksi (denitrifikasi)..... 74
Gambar 14. Ilustrasi berbagai bentuk dari struktur tanah..... 93
Gambar 15. Tanggap varaietas padi IR38 terhadap pemupukan N, P, K pada MH dan MK periode 81-93 dari percobaan jangka panjang di KP. Sukamandi, Balittan Sukamandi. 112
Gambar 16. Fluktuasi luas tanam dan panen; contoh pada MH 1997/98, MK 1998, MH 1998/99 dan MK 1999 117
Gambar 17. Prinsip dari SSNM; contoh pada tanaman jagung..... 119
Gambar 18. Skema penelitian *omission plots* pada jagung..... 120
Gambar 19. Difusi ion melintasi membran sel. 167
Gambar 20. Ilustrasi proses jerapan unsur hara menembus ruang tidak permeabel yang difasilitasi oleh carrier: (a) membran tidak permeabel terhadap ion, (b) kompleks carrier-ion-terbentuk, (c) ion dilepas dalam *inner space*..... 169
Gambar 21. Ilustrasi dari tanda-tanda kekurangan/kahat atau defisiensi unsur hara pada bagian-bagian dari untaian daun 174
Gambar 22. Pengaruh pH tanah terhadap aktivitas mikro-organisme tanah dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman 183
Gambar 23. Contoh perhitungan/estimasi keuntungan dari pemupukan berkaitan dengan kenaikan hasil dan harga dari pupuk berdasarkan takaran dari pupuk.... 185
Gambar 24. Diagram alir keterkaitan berbagai faktor internal tanaman dan faktor eksternal yang menentukan pertumbuhan dan hasil tanaman padi 192
Gambar 25. Diagram alir kondisi internal tanaman 193

Gambar 26. Partisi dan produksi biomas malai, daun dan batang tanaman padi varietas IR64, Ciherang, BP360 dan Batanghari 195
Gambar 27. Perbedaan potensi hasil tanaman padi varietas IR64 yang ditanam di empat provinsi pada waktu tanam berbeda 197
Gambar 28. Perubahan potensi hasil padi karena perubahan suhu udara pada berbagai waktu tanam di Kabupaten Merauke, Papua 198
Gambar 29.Diagram alir keterkaitan antara status air dalam tanah, iklim dan pergerakannya 199
Gambar 30.Diagram alir pergerakan hara di dalam sistem tanah-tanaman dan pengaruh lingkungan 201
Gambar 31. Konsep pemupukan berimbang pada tanaman padi .. 205

I
PENDAHULUAN

Di Indonesia, beberapa tahun setelah produksi padi meningkat dan swasembada beras tercapai pada 1984, karena penerapan teknologi Revolusi Hijau, laju kenaikan produksi padi cenderung melandai. Pengamat perberasan dan peneliti tingkat nasional, regional dan internasional memantau fenomena ini dan menyimpulkan bahwa teknologi Revolusi Hijau adalah penyebab terjadinya pelandaian laju kenaikan produksi karena mendorong terjadinya kejenuhan tanah (*soil fatique*) atau tanah sakit (*soil sickness*), dan timbulnya biotipe atau patotipe baru hama atau penyakit tanaman.

Gagasan baru timbul untuk mengantisipasi dampak yang lebih parah dari penggunaan teknologi Revolusi Hijau; gagasan baru ini, yang bertolak belakang dari Revolusi Hijau, adalah:

- Lisa (Low Input Sustainable Agriculture), dan
- Organic farming/agriculture

Dua gagasan baru ini menarik perhatian dari kalangan Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) atau *Non-Government Organization* (NGO), dan mendapat dukungan dari kalangan akademisi. Argumentasi ilmiahnya semakin menarik, maka semakin banyak pula pengikutnya sampai menyentuh politisi dan aparat pemerintah.

Kelompok lain berpendapat bahwa masalah biotik dan abiotik dapat ditangani selama manusia menggunakan kepandaiannya. Kelompok ini mendapat dukungan dari kalangan pemerintah yang mengejar target kenaikan produksi pertanian untuk mencapai swasembada pangan/papan/pakan. Argumentasi ilmiahnya sama menariknya dengan kelompok yang disebut sebelumnya.

Kontroversi itu berlangsung bertahun-tahun dan merambat dari tingkat pusat ke tingkat daerah. Program intensifikasi dan ekstensifikasi pertanian, khususnya pertanian tanaman pangan berlangsung terus dari regim pemerintahan yang satu ke lainnya. Program intensifikasi didukung oleh subsidi inputs (pupuk, pestisida, benih). Program ekstensifikasi dengan membuka lahan pertanian baru mengabaikan kaedah-kaedah konservasi. Maka, kerusakan lingkungan makin parah berupa erosi, dan kebakaran hutan makin menggelisahkan. Longsor dan banjir pada MH dan kekeringan pada MK tak terelakkan.

Di Kementerian Pertanian, kontroversi pendekatan pembangunan pertanian juga terjadi. Pendekatan lintas Direktorat juga berbeda, dan semua mendapat dukungan dana untuk mengimplementasikannya di daerah sampai di tingkat petani, yang diujudkan sebagai program atau proyek. Dinas Pertanian di kabupaten menerima kedua program/proyek yang dilaksanakan oleh petani. Pendapat penyuluhpun terbelah. Pemerintah Daerah mendukung keduanya dengan arif, sehingga tidak timbul perpecahan. Laporannya, tidak diketahui mana yang benar. Di daerah (Kabupaten Banjarnegara, Purbalingga dan Banyumas) penulis menyaksikan program pembangunan pertanian dengan pendekatan SRI (*Sistem of Rice Intensification*) dan yang menggunakan PTT (Pengelolaan Tanaman dan Sumberdaya Terpadu). Komponen teknologi PTT dan SRI ditunjukkan dalam Tabel 1. Pendekatan SRI dipromosikan sebagai *ecological rice farming*, maka menarik perhatian banyak kalangan. Pengikut SRI mengutamakan penggunaan pupuk organik dan biopestisida yang diujudkan dalam praktek sebagai MOL (Mikro Organisme Lokal).

Dua kelompok penganut *ecological farming* dan penganut teknologi Revolusi Hijau, mengikuti dua aliran atau isme:

- Penganut ekosentrisme: lingkungan adalah sasaran utamanya; tujuannya adalah meniadakan polusi tanah, air dan udara,

Tabel 1. Perbandingan komponen teknologi PTT, SRI (Indonesia), SRI (Mandagaskar).

Komponen teknologi budidaya padi		PTT	SRI (Indonesia)	SRI (Mandagaskar)
(1)	Varietas Unggul Baru (VUB)	Mutlak	Bebas memilih VUB atau lokal	Lokal (mutlak)
(2)	Benih bermutu	ya	ya	Benih petani
(3)	Pupuk organik	Berimbang dengan anorganik (takaran ≤2,0 t/ha	10-15 t/ha	Seluruhnya organik (15-20 t/ha)
(4)	Populasi tanaman (rumpun/ha)	>200 ribu rpn/ha (tata tanam ubin atau legowo)	<90000 rpn/ha (jarak tanam 30 x 30 cm)	40000 rp/ha (jarak tanam 60 x 60 cm)
(5)	Pemupukan dasar	Seluruh pupuk organik, sebagian anorganik	Seluruh pupuk organik, sebagian anorganik	Seluruh pupuk organik
(6)	Pengendalian OPT (Organisme Pengganggu Tanaman)	Prinsip PHT	MOL (Mikro Organisme Lokal)	Biopestisida
(7)	Pengolahan tanah	Pengolahan sempurna/minimum tgt pola tanam	Pengolahan sempurna	Pengolahan sempurna
(8)	Umur bibit	7-20 hari, tgt keong mas	7 hari	7 hari
(9)	Jumlah bibit	1-3 bibit/rpn	1 bibit/rpn	1 bibit/rpn
(10)	Pengairan berselang	Ya (ditentukan Dinas Pengairan)	Ya	ya
(11)	Penyiangan	Dengan landak	Dengan landak	?
(12)	Panen	90-95% gabah menguning	?	?

Sumber: Fagi (2013)

- Penganut antroposentrisme: kebutuhan manusia berupa pangan/papan/pakan yang terus meningkat harus dipenuhi dengan program intensifikasi (teknologi Revolusi Hijau), dan ekstensifikasi (peningkatan intensitas tanam dan panen dengan pola tanam); lahan pertanian adalah sumberdaya yang harus dimasksimalkan penggunaannya; lingkungan menjadi sasaran kedua. Pada kenyataannya pengurasan sumberdaya (*mining*) lebih tampak di lapang.

Kelompok ketiga adalah penganut eko-atroposentrisme timbul kemudian. Kelompok ini adalah penganjur dari PHT (Pengendalian Hama Terpadu). PHT tidak mentabukan penggunaan pestisida, tetapi menempatkannya sebagai komponen terakhir dengan berpedoman kepada jargon "penggunaan pestisida secara bijaksana". Penganut ekosentrisme mengintervensi dengan mengganti penggunaan pestisida secara bijaksana menjadi "zero pestisida", dan mengutamakan penggunaan 4-5 komponen lainnya.

Buku ini bertujuan untuk memperkuat pendekatan eko-antroposentris ~ intensifikasi dengan memperhatikan lingkungan. Pembuka dari pembahasan adalah berkenaan dengan *sustainability* ~ bahan organik sebagai sumber unsur hara tanaman atau bahan amelioran, dan dampaknya yang positif dan negatif; pokok bahasan kedua adalah efisien produksi. Penulis fokuskan pada efisiensi dengan tujuan untuk mengurangi biaya produksi (yang menyangkut efisiensi penggunaan pupuk anorganik), bertujuan untuk menekan dana subsidi pupuk.

Kontras antara penganut ekosentrisme dan antoprosentrisme dan pengembangan penganut eko-antroposentrisme diklarifikasi dengan kiat-kiat yang berkenaan dengan ilmu tanah dan diperkuat oleh ilmuwan bertaraf dunia, bahkan oleh penerima Hadiah Nobel Perdamaian Norman Borlaug (Canpotex, 2010).

II
ISU-ISU DALAM PRAKTEK PEMBANGUNAN PERTANIAN

Pada era pemerintahan Orde Baru, isu-isu nasional kontroversial telah timbul berkenaan dengan pengelolaan sumberdaya alam. Pimpinan nasional pada periode itu khawatir kalau kontroversi itu tidak ditangani bukan kemajuan, melainkan hambatan terhadap pembangunan nasional yang akan dituai, dan juga ketidakefisienan penggunaan anggaran pembangunan. Maka, pimpinan nasional memberi arahan agar KISS (koordinasi, integrasi, sinkronisasi dan sinergi) harus diterapkan dalam managemen sumber daya alam.

Pada era reformasi, MPR menyadari tentang isu-isu kontroversial pengelolaan sumberdaya alam yang diwariskan oleh Orde Baru, maka diterbitkan TAP MPR-RI No. IX/MPR/2001 (Fagi, 2015), tentang reformasi agraria dan pengelolaan sumberdaya alam. Reformasi agraria diprogramkan dalam bentuk sertifikasi lahan untuk pertanian seluas 9 juta ha, oleh pemerintah periode 2009/2010-2013/2014, tetapi belum terealisasi. Tetapi pengelolaan sumberdaya alam terealisasi berupa perluasan perkebunan kelapa sawit dengan mengorbankan lahan kehutanan dan lahan gambut. Keberlanjutan (*sustainability*) laju pertumbuhan ekonomi nasional adalah landasan dari keputusan itu.

KISS dalam managemen sumberdaya alam pada hakekatnya menyangkut aspek biofisik, teknik dan sosial-ekonomi (IRRI, 1997). Biofisik menyangkut lahan atau *land* (tanah dan iklim). Tanah adalah faktor produksi pertanian yang dapat ditangani, tetapi iklim tidak dapat ditangani. Teknik adalah upaya dalam mengelola tanah secara lestari dan upaya adaptasi terhadap ketidak pastian iklim muson. Sebagai indikator utama dari iklim muson adalah curah hujan yang intensitas dan distribusinya

dalam setahun sulit diramal. Untuk budidaya padi, Huke (1976) memasukkan wilayah iklim Indonesia dalam kelompok 2B. Keberhasilan program intensifikasi terganggu oleh satu parameter iklim (curah hujan) yang tidak menentu; curah hujan adalah sumberdaya air yang dialirkan melalui sungai atau waduk ke lahan pertanian.

Pengetahuan tentang tanah memberi petunjuk bagi keberlanjutan produksi pertanian dapat dijaga atau lestari, sarana produksi pertanian dapat dimanfaatkan secara efektif dan efisien, kesenjangan hasil antara pelaku program intensifikasi pertanian dan antara sentra produksi pertanian dapat dipersempit.

Dua Makna *Sustainability*

Keberlanjutan atau *sustainability* sering diucapkan oleh banyak pihak ~ aparat negara, politisi, akademisi, praktisi, dsb. Pengertiannyapun campur aduk, bergantung pada acara yang dihadirinya. Uraian berikut ini bertujuan untuk mengklrifikasi dan menarik garis pemisah yang jelas antara dua makna dari *sustainability*:

- Pengikut aliran ekosentrisme mengartikan *sustainability* kaitannya dengan lingkungan (ekosistem/ekologi), dan mempromosikan *ecological farming*.
- Pengikut aliran antroposentrisme mengaitkan *sustainability* dengan kebutuhan manusia yang terus meningkat, tetapi mengabaikan kelestarian lingkungan.

Pertanian yang menjadi obyek dari kedua pengikut aliran tersebut, mempertimbangkan *inputs* produksi dan *outputs* atau hasil pertanian. Ratio antara *inputs* dan *outputs* mempunyai konsekuensi. Konsekuensi inilah yang harus dipertimbangkan/ ditelaah oleh pembaca. Reeves (1998) menunjukkan konsekuensi dari tingkat masukan (*inputs*) dan keluaran (*outputs*) yang

berorientasi pada ekosentris dan antroposentris (Tabel 2). Proporsi *inputs/outputs* yang pertama adalah LISA (*Low Inputs Sustainable Agriculture*); *sustainable* dalam hal lingkungan, tetapi produksi tidak akan mencukupi kebutuhan, sehingga harus mengimpor. Proporsi yang kedua dan ketiga tidak *sustainable* dilihat dari konsekuensinya. Sedangkan proporsi keempat *sustainable* dalam penyediaan produk pertanian, tetapi harus mewaspadai ketersediaan sarana produksi yang tepat jenis, tepat jumlah, tepat waktu dan tepat kualitas. Teknologi PTT direncanakan untuk menekan polusi air dan udara, serta meningkatkan efisiensi produksi. Ini adalah teknologi yang ditawarkan oleh penganut pendekatan eko-antroposentrisme.

Tabel 2. Tingkat masukan dan keluaran dalam sistem produksi pertanian pangan kaitannya dengan ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan serta konsekuensinya.

Tingkat masukan (inputs)	Tingkat keluaran (outputs)	Keberlanjutan (ya/tidak)	Konsekuensi
Rendah	Rendah	ya	▪ Produksi tidak mencukupi ▪ Impor makin besar
Rendah	Tinggi	tidak	▪ Cenderung meluasnya degradasi sumberdaya ▪ Pengurasan unsur hara ▪ Erosi di lahan kering
Tinggi	Rendah	tidak	▪ Penumpukan hara dan ketidakseimbangan hara ▪ salinisasi
Tinggi	Tinggi	ya	▪ Sarana dan modal harus tersedia tepat waktu ▪ Polusi air atau udara diawasi

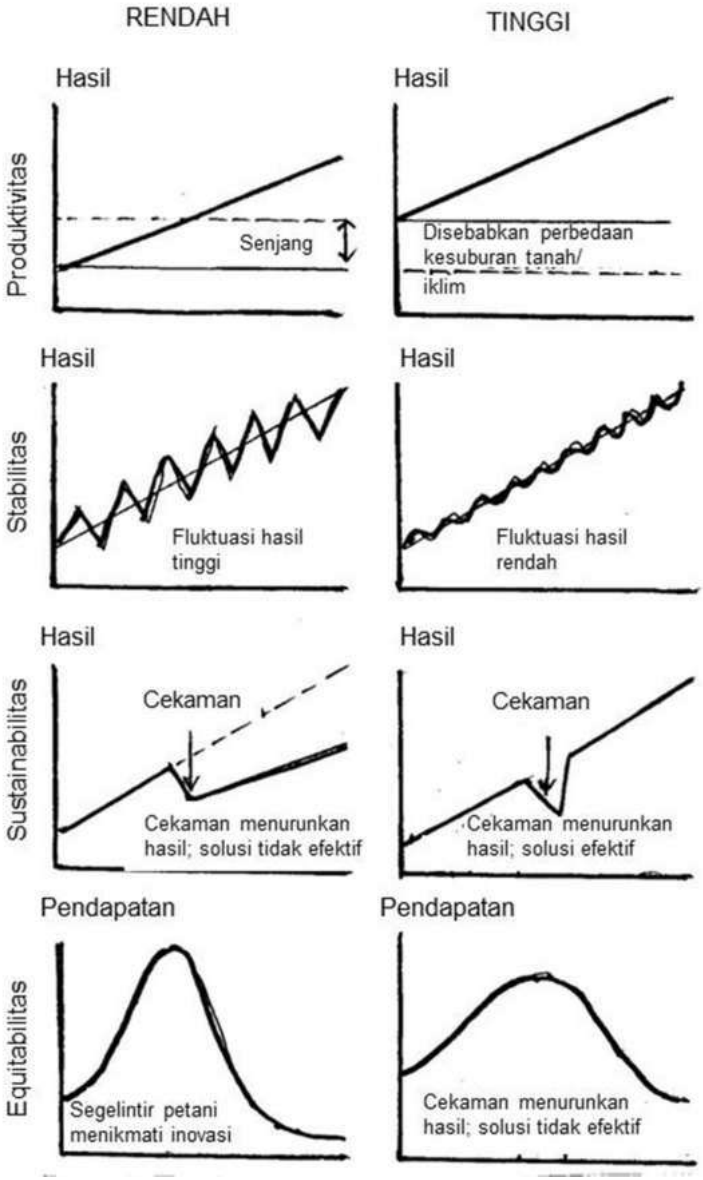
Sumber: Reeves (1998)

Sustainability harus dipersepsikan sama oleh semua pihak agar penanggulangannya tidak bertentangan satu sama lain.

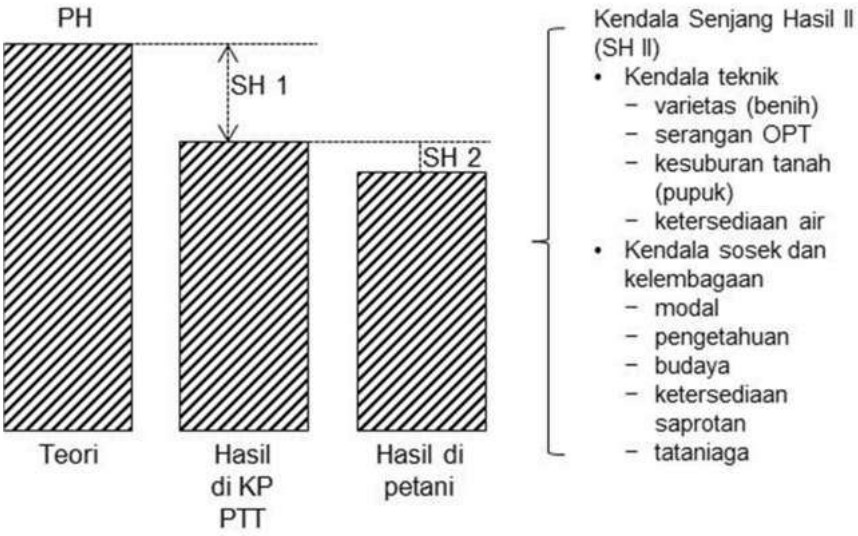
Sustainability adalah salah satu ciri dari kekayaan agroekosistem (*agroecosistem properties*), yaitu *productivity, stability, sustainability, equitability* (Gambar 1). Unsur dari agroekosistem adalah lahan atau *land*, yang menurut FAO terdiri atas tanah dan iklim. Penyajian-penyajian terdahulu adalah landasan dirumuskannya kesesuaian lahan bagi komoditas pertanian. Dalam Gambar 1, produktivitas rendah karena kesesuaian lahannya marjinal, dan produktivitas tinggi diperoleh dari lahan yang kesesuaian tinggi. Betapapun banyaknya inputs yang diberikan pada lahan yang kesesuaiannya marjinal tidak akan mampu menyamai tanggap tanaman pada lahan yang sangat sesuai. Iklim (fluktuasi cuaca) curah hujan menyebabkan stabilitas hasil rendah di suatu lokasi akibat dari kekurangan air atau serangan hama/penyakit (daerah endemis), tidak demikian di lokasi yang lain. Di lahan berlereng, erosi menyebabkan tanah terkuras kesuburannya. Cekaman kekurangan air menurunkan hasil, tetapi ketika hujan normal hasil kembali naik, tetapi laju kenaikan hasil itu tidak proporsional; tidak demikian pada lahan yang dikonservasi. Karena, pemilikan lahan pertanian sempit dengan modal usahatani terbatas, program intensifikasi tidak akan berdampak merata (equitabilitas rendah). Bantuan modal pemerintah (kredit KUT) dan pola tanam akan membuat pemerataan lebih baik.

Senjang Hasil

IRRI mempelajari secara serius dan sistematis senjang hasil padi antara hasil tanaman padi di lahan petani dan hasil padi di kebun percobaan (penelitian) (De Datta *et. al.* 1978). Senjang hasil disebabkan oleh faktor biofisik, teknik dan sosial-ekonomi/kelembagaan. Hasil di kebun percobaan sekalipun tidak mencapai potensi maksimum (Gambar 2).



Gambar 1. Ilustrasi perbedaan dua ciri dari agroekosistem (dimodifikasi dari sumbernya)
Sumber: Krisnawati *et. al.* (1988)



Gambar 2. Konseptualisasi senjang hasil dan faktor-faktor penyebabnya.
Sumber: De Datta *et. al*. (1978)
Keterangan gambar:
PH = potensi hasil
SH = senjang hasil
PTT = Pengelolaan Tanaman dan Sumberdaya Terpadu

Kendala dari senjang hasil I yang tidak dapat diatasi berupa perbedaan tingkat kesuburan tanah; penambahan inputs (pupuk anorganik plus pupuk organik) dalam jumlah sangat besar akan menghasilkan B/C ratio <1,0 atau merugikan petani (Moorman dan van Breemen, 1978). Lahan yang tidak sesuai bagi tanaman padi, tetapi sesuai bagi tanaman lain. Pusat Penelitian Tanah dan FAO membuat kriteria kesesuaian lahan bagi berbagai jenis tanaman. Tingkat kesesuaian lahan ini dapat digunakan sebagai landasan untuk mempersempit senjang hasil.

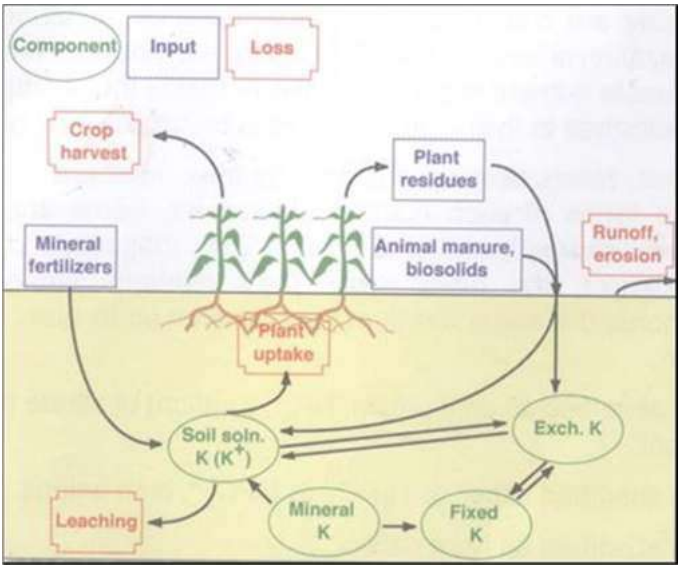
Senjang hasil II dapat diatasi dengan teknik budidaya dan rekayasa sosial-ekonomi dan kelembagaan (modal, pelatihan, akses ke sarana produksi dan tataniaga).

Kontroversi Pertanian Organik

Sampai saat ini kelebihan dan kekurangan dari pertanian organik dibanding dengan pertanian kovensional masih kotroversial. Perdebatannyapun lebih bersifat emosional daripada ilmiah. Pokok bahasan dalam paparan berikut berkenaan dengan penyebab mengapa penggunaan bahan organik sebagai pupuk organik tidak diterapkan secara luas oleh petani, walaupun bahan organik sebagai pupuk telah lama dipraktekkan oleh petani sebelum teknologi pertanian intensif (maju) diintroduksi secara masif. Buresh dan Doberman (2010), Cosico (2010), Mamaril *et. al.* (2009) dan Syam (2008) mereview latar belakangnya secara komprehensif, seperti diuraikan berikut.

- Para penganjur kelestarian lingkungan melalui pertanian organik mempertentangkan makna organik dan kimia. Mereka mengabaikan bahwa pupuk organik dan pupuk anorganik sama-sama terbentuk dari unsur kimia.
- Apa perbedaan dan persamaan antara pupuk organik dengan pupuk anorganik?
    - pupuk organik berasal dari tanaman atau khewan, maka kaya unsur karbon, sedangkan pupuk anorganik disintesis dari elemen yang bukan mahluk hidup, maka miskin unsur karbon,
    - keduanya adalah sumber hara bagi tanaman; N (nitrogen) dari pupuk anorganik dalam bentuk amonium sulfat dan urea, di dalam tanah terurai menjadi NH_4^+ kemudian NO_3^- pada kondisi tertentu, sementara N dari bahan organik berbentuk protein, asam amino, amida, dll. Ketika dibenamkan ke dalam tanah terurai menjadi NH_4^+ dan NO_3^- melalui mineralisasi,
    - akar tanaman menjerap NH_4^+ dan NO_3^-; akar tanaman tidak membedakan atau memilih asal muasal dari NH_4^+ atau NO_3^- itu.

Contoh yang sederhana adalah proses jerapan unsur K (kalium) dari sejak sumber K itu diberikan ke dalam tanah sampai dijerap oleh akar tanaman (Gambar 3). Tanaman tidak membedakan unsur hara dalam bentuk kation (K^t, NH_4^+) atau anion (NO_3^-) itu berasal dari pupuk organik atau pupuk anorganik. Dengan kata lain tidak ada preferensi khusus dari akar tanaman terhadap asal-usul dari unsur hara yang akan dijerap. Gambar 3 menunjukkan bahwa unsur hara dalam bentuk ion (anion/kation) itu mengikuti proses yang terjadi di dalam tanah:



Gambar 3. Pergerakan dan ketersediaan hara K tanah dalam budidaya tanaman.
Sumber: Canpotex (2004)

(a) unsur hara akan langsung dijerap oleh akar tanaman yang sedang tumbuh,

(b) unsur hara akan tinggal sementara di dalam tanah (komplek adsorpsi), kemudian dijerap oleh akar tanaman,

(c) unsur hara tercuci (*leaching*) ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam,

(d) unsur hara hilang mengikuti aliran air permukaan (run off water)

- Para penganjur pertanian organik dalam argumentasinya seringkali menyandingkan sekaligus pupuk dengan pestisida kimia untuk mendramatisasi bahayanya semua inputs yang berbau kimia, mengabaikan fakta bahwa pupuk anorganik adalah untuk mensuplai unsur hara bagi tanaman sedangkan pestisida kimia adalah untuk membunuh hama/penyakit tanaman; jadi, pupuk anorganik pendukung kehidupan, sedangkan pestisida kimia pemberantas kehidupan.
- Karena KTK bahan organik yang tinggi, maka dipersepsikan mampu memperbaiki tekstur tanah, padahal tekstur tanah adalah proporsi dari partikel pasir, debu dan liat yang terbentuk melalui pelapukan bahan induk tanah selama ratusan, bahkan ribuan tahun, yang tak mungkin terpenuhi oleh pemberian bahan organik sebanyak ratusan, bahkan ribuan ton.
- Fakta yang benar adalah pupuk organik memperbaiki struktur tanah, porositas dan aerasi melaui granulasi (Fagi dan De Datta, 1983; De Datta dan Hundal, 1983 dalam Cosico, 2010).

Kandungan unsur hara dalam bahan organik sangat rendah dan bervariasi antar sumber bahan organik, tetapi menyumbang karbon organik dalam tanah (Tabel 3). Proses dekomposisi dan mineralisasi memperbesar kekayaan biologi dan fisik tanah.

Tabel 3. Kandungan unsur hara makro dari beberapa bahan organik.

Material organik	Air	C	N	P	K	Ca
	(% bahan segar)					
Kotoran ternak	-	-	0,3	0,1	0,1	-
Kompos kotoran ternak	35	30-35	1,5	1,2	2,1	2,0
Kompos sampah	40	16	0,6	0,2	2,3	1,1
Kotoran ayam (pupuk)	55	15	1,4-1,6	0,3-0,8	0,7-0,8	2,3
Kotoran kambing (pupuk)	50	-	0,8	0,7	1,5	0,8
Kotoran domba (pupuk)	50	-	1,0	0,7	1,5	1,7
Pupuk saringan padat gula tebu (filtercake)	75-80	8	0,3	0,2	0,1	0,5

Catatan: 1 kg kandungan hara per ton pupuk = % kandungan hara x 10

Sumber: Canpotex (2004)

Dalam hal pupuk kandang perlu perhatian serius terhadap hal-hal berikut (Canpotex, 2004):

- Di daerah geografis tertentu, penggunaan pupuk kandang secara berlebihan sebagai suplemen dari pupuk anorganik dapat menimbulkan akumulasi nitrat (NO_3^-), dan jika tercuci dan masuk ke dalam air tanah (*ground water*) menyebabkan:
  - polusi NO_3^- dalam air sumur yang digunakan sebagai sumber air minum penduduk
  - unsur P terlepas dari fiksasinya oleh partikel liat dan naik ke permukaan tanah, dan hilang melalui air limpasan atau erosi tanah
  - sejumlah ammonia (NH_3) dapat hilang oleh votalisasi
- Pada umumnya jumlah pupuk kandang tidak cukup tersedia untuk memenuhi anjuran *organik farming* (≥10 ton/ha), dan kandungan unsur hara yang sangat rendah tidak ekonomis dari segi transportasi pupuk kandang yang produsennya terpencar dan cukup jauh dari lahan pertanian petani,

- Penggunaan pupuk kandang (dan *night soil*/seperti di Tiongkok) yang jumlahnya tidak terukur membahayakan kesehatan manusia akibat akumulasi logam berat (*heavy metals*) dan oleh penyakit,
- Unsur hara yang dikandungnya tidak tersedia dalam waktu cepat bagi tanaman yang sedang tumbuh.

Pembenaman pupuk kandang yang belum matang dan pembenaman jerami padi meningkatkan emisi gas rumah kaca metana (CH4) (Wihardjaka dan Setyanto, 2007).

Sebaliknya, pupuk anorganik mengandung unsur hara yang terukur jumlahnya dan cepat tersedia bagi tanaman, maka menjamin penggunaan unsur hara secara efektif dan efisien, sebab itu dampak negatifnya terhadap lingkungan relatif minimal. Karena kandungan unsur haranya yang tinggi, pupuk anorganik mudah dan ekonomis untuk dikirim ke berbagai jarak dari domisili/lahan petani.

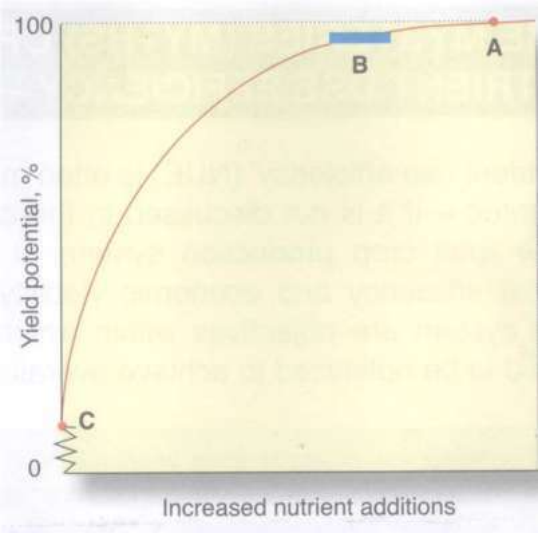
Efisiensi Penggunaan Pupuk

Pengertian tentang efisiensi penggunaan unsur hara (disingkat EPUH) dari pupuk bisa salah diartikan atau salah interpretasi, kalau tidak dibahas dalam kontek efisiensi dari sistem produksi pertanian (khususnya pangan) secara keseluruhan. Efisiensi dan viabilitas ekonomi dari sistem produksi tanaman pangan adalah tujuan dengan mengoptimalkan semua komponen teknologi; pupuk adalah satu komponen di antara paket teknologi.

Tidak banyak petani yang mampu mencapai lebih dari 75-80% potensi hasil, bahkan petani di negara maju sekalipun. Untuk meraih lebih dari capaian potensi hasil mereka menggunakan pendekatan baru, yaitu pertanian presisi (*precision agriculture*), yang dikenal dalam praktek sebagai pengelolaan pertanian spesifik lokasi. Konsep EPUH masuk dalam agendanya.

Kalau unsur hara adalah inputs yang dibeli berupa pupuk, kepemilikan lahan pertanian adalah faktor pembatas dalam upaya meningkatkan pendapatan usahataninya, dan dalam mencapai efisiensi penggunaan lahan (EPL). Ada cukup luas lahan yang kalau dibuka dapat ditanami, tetapi potensi lahan demikian bersifat marjinal. Penggunaan lahan demikian akan memerlukan biaya banyak. Atas dasar itu dirumuskan kesesuaian lahan untuk berbagai komoditas pertanian. Suatu lokasi sesuai untuk komoditas tertentu, tetapi kurang sesuai, bahkan kesesuaiannya marginal untuk komoditas pertanian lainnya. Penggunaan pupuk plus input yang lain menentukan efisiensi sitem produksi.

Pupuk anorganik dan organik adalah di antara komponen teknologi dari sistem produksi. Pupuk anorganik khususnya adalah fokus bahasan berikutnya, karena pupuk disubsidi pemerintah. Gambar 4 mengilustrasikan kurva tanggap atau respon tanaman terhadap pemupukan anorganik:

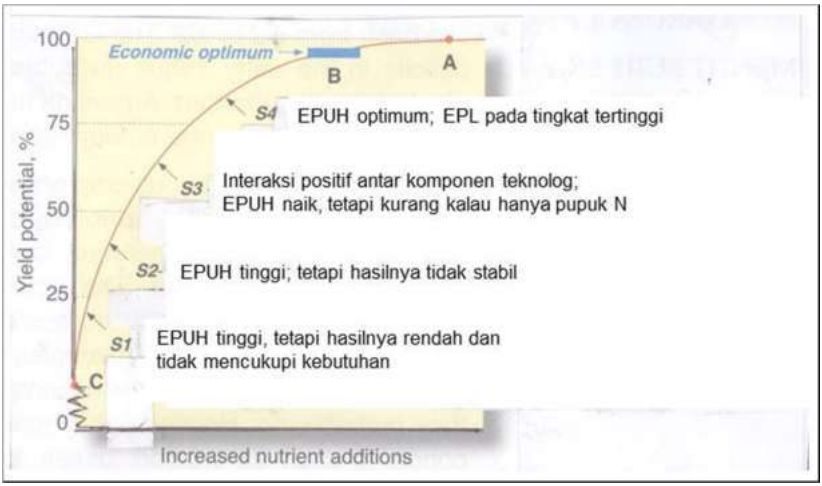


Gambar 4. Kurva tanggap (respon) tanaman terhadap penambahan unsur hara.
Sumber: Canpotex (2004)

Keterangan gambar:

- C adalah tingkatan hasil yang diperoleh dari kontrol (tanpa pemupukan); titik C paling rendah di lahan marjinal,
- B adalah besaran hasil yang dipengaruhi oleh variabilitas biaya produksi, seperti ditargetkan dalam sistem produksi; target pada EPL tertinggi dan komponen teknologi berinteraksi dengan pupuk secara optimum, baik agronomis dan ekonomis; *net return to inputs* tercapai melalui pola tanam,
- A adalah potensi hasil maksimum (100%) yang tercapai jika semua komponen teknologi dan iklim berinteraksi secara optimum.

Keterkaitan antara EPUH dan EPL dijelaskan dengan memilah-pilah kurva Gambar 4 dalam 4 segmen, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5:



Gambar 5. Ilustrasi keserasian (*compatibility*) anatara EPUH (Efisiensi Penggunaan Unsur Hara) dengan EPL (Efisiensi Penggunaan Lahan).
Sumber: Canpotex (2004)

- S1 (hasil rendah): yang diberikan hanya residu tanaman dan pupuk kandang yang kandungan unsur haranya tidak cukup menaikkan kurva. Penambahan sedikit pupuk anorganik dapat menaikkan kurva walaupun tidak mencapai maksimum, tetapi lereng (*slope*) nya terjal. Hasil yang rendah itu terjadi di lahan pertanian yang EPL-nya rendah. Pada lahan berlereng pertumbuhan tanaman dan kanopinya yang tidak menutup permukaan tanah dapat menyebabkan erosi.
- S2: Pertanian moderen dengan penanaman varietas unggul baru (VUB), tetapi masih dijumpai ketidak seimbangan antara pemberian pupuk N dengan pupuk P dan K. Kurva agak kurang terjal, tetapi EPUH masih cukup tinggi yang dicapai dari pemupukan N; dalam jangka panjang unsur P, K dan S dapat terkuras dari dalam tanah. EPL masih belum optimum, karena hasilnya masih dibawah potensinya.
- S3: Tanggap tanaman terhadap pemupukan masih baik dan hasil naik, tetapi kurva kurang terjal. Dalam keadaan demikian perlu dievaluasi peranan unsur Ca, Mg dan S, termasuk unsur mikro. Di lahan berlereng tanaman tumbuh baik dan menghasilkan hijauan cukup banyak, maka menekan erosi. Pada lahan yang suburpun kurva hasil cenderung melandai kalau unsur hara yang terkuras tidak dikoreksi; akibatnya kurva hasil akan kembali dari S3 ke S2.
- S4: Tanaman tumbuh baik, ekonomi optimum tercapai pada kisaran B, membuat sistem produksi berkelanjutan.

III
TELAAH POPULER TANAH PERTANIAN

Klarifikasi isu-isu yang diuraikan dalam BAB II dan penanggulangan masalah yang ditimbulkan akan lebih jernih dan terarah melalui pemahaman tentang tanah. Pemahaman tentang tanah dimulai dari pengetahuan tentang pembentukan tanah.

Proses pembentukan tanah unik dan pengertian tentang tanahpun berbeda bergantung pada aspirasi dari pengguna tanah. Jadi, kontroversi dimulai dari awal ketika tanah telah terbentuk dan dimanfaatkan.

Tanah dan Faktor Pembentuknya

Pada awalnya hanya 4 faktor utama yang dirumuskan sebagai pembentuk tanah (Jenny, 1961 dalam Buol *et. al*. 1973)

$$s = f\,(p, cl, o)\ t^{o}$$

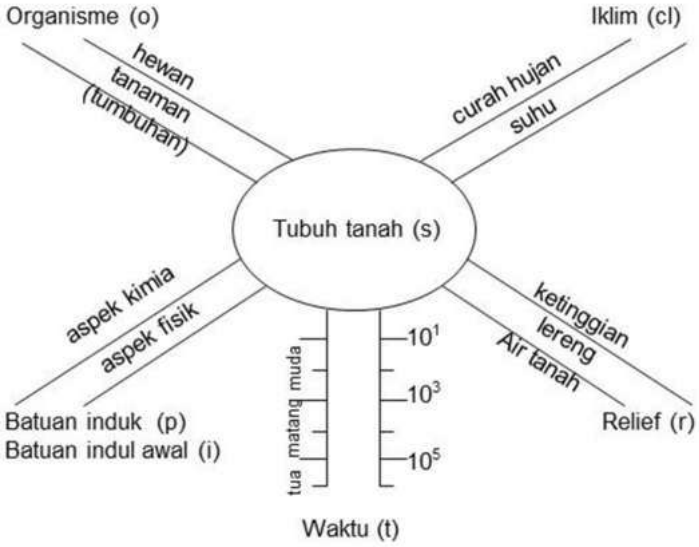
Di mana:

s = tanah
p = bahan induk
cl = iklim suatu wilayah
o = organisme (tanaman dan hewan)
t^{o} = umur dari tanah dari sejak pembentukannya (muda, matang, tua)

Buol *et. al.* (1973) mengoreksi dengan menambahkan relief sebagai salah satu faktor pembentuk tanah. Gambar 6 mengilustrasikan 5 faktor pembentuk tanah tersebut.

Sekitar 45% daratan Indonesia terdiri atas perbukitan dan pegunungan dengan kemiringan dan ketinggian yang sangat beragam. Maka, sebaran vegetasi (keanekaragaman hayati) sangat kaya. Sebab itu daratan Indonesia tertutup oleh berbagai jenis

tanah yang kesesuaiannya bagi berbagai jenis tanaman juga sangat heterogen.



Gambar 6. Diagram faktor-faktor pembentuk tanah.
Sumber: Buol *et. al*. (1973)

Setelah tanah terbentuk para pihak mengartikan tanah berbeda-beda dan kontroversial (Buol *et. al.,* 19,73):

- Praktisi pertanian: tanah adalah media tumbuh tanaman dan ternak
- Ahli kimia tanah: menganggap tanah sebagai saluran atau tabung reaksi di mana unsur kimia masuk dengan kekuatan alami dan memfasilitasi transportasi unsur hara dari pupuk untuk digunakan oleh tanaman.
- Ahli fisika tanah: tanah diartikan sebagai massa fisik yang karakteristik dan reaksi/perilakunya berubah akibat perubahan suhu dan kandungan/regim air.

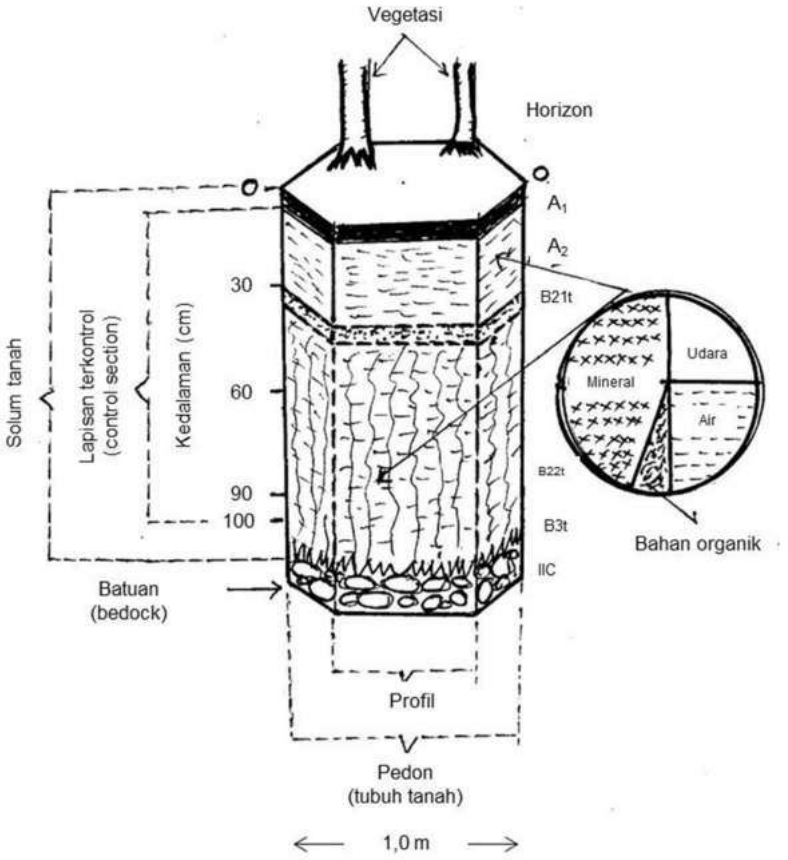
- Ahli ekologi: memandang tanah sebagai bagian/unsur dari lingkungan yang kondisinya dipengaruhi oleh organisme, dan kemudian menentukan perkembangan organisme sendiri.
- Industrialis (pertanian): tanah diibaratkan mesin yang bagian-bagiannya akar, batang, daun yang memfabrikasi produk pertanian dan ternak.
- Ahli sejarah: tanah adalah catatan/dokumen dari masa lalu.
- Pelukis dan filosofis: melihat tanah sebagai keindahan, dan mistis yang mengandung kekuatan serta instrumen kehidupan dan kematian.

Perbedaan pandangan, pengertian dan definisi tanah yang menghasilkan aliran ekosentrisme dan antrosentrisme.

1. Tubuh Tanah

Tubuh tanah (pedon) dilustrasikan dalam Gambar 7. Tatanan lapisan tanah disebut profil tanah. Lapisan tanah berlapis-lapis dan ditandai; susunan lapisan-lapisan tanah disebut horizon. Kedalaman tanah sampai sekitar 100 cm disebut solum. Bagian dari solum yang dapat diatur/dikelola disebut lapisan terkontrol (*control section*).

Di lapang horizon atau lapisan tanah didiskripsikan warna, tekstur, konsistensi, struktur, kutan, nodul atau konkresi, perangkap udara (void), pH, karakteristik pembatasnya, termasuk ketebalan dan dalam di bawah permukaan tanah dari tiap-tiap horizon. Diskripsi dari tubuh tanah, utamanya profil dan horizon adalah dasar dari klasifikasi tanah menuju katagori yang pasti, yaitu jenis tanah.



Gambar 7. Ilustrasi tubuh tanah dan bagian-bagian penanda/spesifikasinya. Sumber: Buol *et. al*. (1973) dan Brady (1974)

Deskripsi profil dan horizonnya memerlukan keahlian dan pengalaman khusus. Kualitas dari hasil deskripsi menunjukkan keahlian petugasnya.

2. Bahan induk

Pada tingkat eksplorasi Lembaga Penelitian Tanah menunjukkan 10 macam bahan induk, yaitu bahan aluvial, pasir pantai, endapan liat tua, batuan masam, batuan kapur, campuran batuan endapan, batuan metamorf, endapan beku, batuan beku masam, batuan beku intermedier dan basa (LPT, 1969):

- Bahan aluvial: endapan liat dan pasir di jalur aliran sungai, dataran rendah dan pantai. Kekayaan mineralnya sangat bervariasi; cadangan mineralnya tinggi dari endapan bahan vulkan (letusan gunung)
- Endapan pasir pantai: berupa beting-beting pasir pantai yang sejajar dengan garis pantai; berkadar kwarsa tinggi.
- Endapan liat tua: tersusun dari batu liat, batu kapur dan napal yang berasal dari perbukitan tersier; liat berkapur.
- Batuan endapan masam: kikisan batuan endapan tersier; berkadar tinggi kwarsa.
- Batuan kapur: perbukitan kapur; batu kapur berbutir halus yang terdiri atas kalsit mikrokristalin.
- Batuan beku tersier dan basa: sebagian besar berupa abu vulkan yang terdiri atas abu, tuf dan bahan eflata (di sekitar pusat-pusat letusan gunung); cadangan mineralnya masih tinggi, karena proses pelapukannya masih berlanjut; tanah yang terbentuk cukup subur.
- Batuan beku masam: berasal dari batuan vulkan yang bersifat masam, berkadar kwarsa tinggi, plagioklas masam dan piroksin.
- Kompleks batuan endapan: daerah perbukitan tersier batu pasir, batu liat dan napal tersebar.

- Kompleks batuan endapan dan beku: batuan tersier yang terdiri atas batu pasir, breksi dan konglomerat yang mengandung tuf; hasil pelapukannya berkadar kwarsa tinggi.
- Kompleks batuan endapan metamorf: berupa batuan endapan tersier tua dalam kompleks bersama metamorf; hasil pelapukannya kaya kwarsa,

3.Relief

Lereng

Lereng atau kemiringan lahan adalah salah satu pemicu dari erosi. Makin curam lereng makin besar erosi karena semakin cepat dan kuatnya aliran air permukaan. Erosi mengelupas lapisan tanah yang telah matang-tua, meninggalkan lapisan tanah yang muda (sebagai bahan induk baru). Hal ini menyebabkan lapisan tanah seakan muda kembali.

Wilayah berlereng dikelompokkan (Badan Litbang Pertanian, 2006; LPT, 1969):

- Datar: lereng <3%; beda tinggi < 2 m
- Berombak: lereng 3-8%; beda tinggi 2-10 m
- Bergelombang: lereng 8-15%; beda tinggi 10-50 m
- Berbukit: lereng 15-30%; beda tinggi 50-300 m
- Bergunung: lereng >30%; beda tinggi > 300 m

Ketinggian

Ketinggian atau elevasi dinyatakan dalam m di atas permukaan laut (mdpl). Posisi suatu lokasi pada perbukitan dan pegunungan dinyatakan berdasarkan tingginya dpl (Badan Litbang Pertanian, 2006):

- Dataran rendah : <350 m dpl
- Dataran medium: 350-700 m dpl
- Dataran tinggi: >700 m dpl

Badan Pertanahan Nasional menetapkan lahan pada ketinggian >1000 m dpl dan kemiringan >45%, sebagai kawasan usaha terbatas, diutamakan sebagai kawasan hutan lindung. Departemen Kehutanan menetapkan hutan lindung pada ketinggian lahan >2.000 m dpl dan kemiringan >40%.

Ketinggian suatu kawasan berhubungan erat dengan jenis vegetasi (flora) dan hewan (fauna), sebagai salah satu faktor dari pembentuk tanah.

4. Iklim

Unsur iklim yang berpengaruh terhadap pembentukan tanah adalah curah hujan dan suhu. Atlas sumberdaya iklim pertanian skala 1:1.000.000 menunjukkan sebaran tipe curah hujan ~ iklim kering atau basah (Balitklimat, 2003).

Indonesia beriklim tropika dengan suhu rata-rata tinggi. Ketinggian wilayah menyebabkan perbedaan suhu.Jadi, curah hujan selain menentukan sebaran flora dan fauna yang berbeda, demikian juga suhu, curah hujan berpengaruh terhadap kedalaman muka air tanah (*ground-water table*).

Gunung-gunung yang masih aktif melempar dan menyebarkan lahar dan bebatuan, sebagai bahan induk dari pembentukan tanah. Variasi bahan induk pada berbagai kemiringan dan ketinggian dengan berbagai tipe curah hujan dan suhu menyebabkan variasi dalam proses pelapukan (*weathering process*). Interaksi faktor-faktor tersebut menghasilkan berbagai jenis tanah.

Penciri Kesesuaian Lahan Pertanian

Tanah adalah bagian yang dapat dikontrol (*control section*) dari tubuh tanah (Gambar 7). Bagian yang terkontrol itu disekat-sekat

menjadi lapisan tanah (horizon). Kedalaman dari *control section* dan horizon sangat bervariasi dan tidak seideal seperti dalam ilustrasi itu. Bagian yang terkontrol terbagi menjadi bahan mineral, bahan organik (akar tanaman, jasad mikro/makro), air disebut larutan air (*soil solution*) dan udara yang mengisi rongga-rongga dan pori-pori tanah (pori-pori makro dan mikro); pori-pori mikro membentuk jaringan seperti pipa kapiler dari mana air tanah menguap (evaporasi) ke udara, dan air hujan atau air irigasi masuk ke lapisan tanah dan mengisi pori-pori makro dan rongga-rongga udara (Kramer, 1975).

Bahan mineral, selanjutnya disebut tanah mineral didefinisikan sebagai bagian atas dari *regolith* (Brady, 1974) atau *control section* (Buol *et. al.* 1973) yang mengalami pelapukan secara biologis. Bahan organik di dalam tanah memfasilitasi pertumbuhan mikroba dan akar tanaman dalam proses pelapukan tersebut. Air tanah menunjang pertumbuhan tanaman (akar). Interaksi ketiganya menjadikan tanah bersifat dinamis (Kotak 1). Definisi tanah dalam Kotak 1 menegaskan bahwa mineral tanah dan bahan organik dalam tanah paling berperan dalam pertumbuhan tanaman.

Kotak 1 : Definisi tanah

Soil is a collection of natural bodies which has been synthesized in profile form from a variable mixture of broken and weathered minerals and decaying organic matter, which covers the earth in a thin layer, and which supplies, when containing the proper amounts of air and water, mechanical support and sustenance for plants.

Brady, 1974

Dalam kriteria kesesuian lahan (CSR-FAO, 1983) penciri dari kesesuian lahan (lahan = iklim dan tanah) dalam Tabel 4 dan 5, adalah:

(1) Iklim (suhu udara, curah hujan)
(2) Lingkungan perakaran (drainase alami, kedalaman lapisan olah)
(3) Kesuburan tanah (tekstur, kandungan bahan orgaik, pH tanah, N tanah, P_2O_5 tersedia, K_2O, Ca, Mg dapat tukar), kejenuhan Al,
(4) Salinitas
(5) Topografi (kemiringan lahan)

Tabel 4. Contoh kesesuaian lahan untuk padi sawah.

Karakteristik lahan (kriteria kualitas)	Nilai kesesuaian			
	S1	S2	S3	N
Suhu tahunan (rata-rata °C)	25-29	30-32	33-35	>35
Ketersediaan air		24-22	21-18	<18
• Jumlah bulan kering (75 mm)	0-3	3,1-9	9,1-9,5	>9,5
• Curah hujan tahunan rata-rata (mm)	>1.500	1200-1500	800-1200	<800
Lingkungan perakaran				
• Drainase alami	agak jelek agak baik	sangat jelek jelek	baik	agak berlebihan, berlebihan
Tekstur tanah (lapisan tanah permukaan)	liat berpasir, lempung debu, debu, lempung liat	lempung berpasir, liat berdebu	pasir berlempung, liat	kerikil, pasir
Kedalaman perakaran (cm)	>50	41-50	20-24	<20
Retensi unsur hara: KTK (lapisan tanah bawah, me/100 g)	sedang	rendah	sangat rendah	
pH lapisan tanah	5,5-7,0	7,1-8,0	8,1-8,5	>9,0
permukaan		5,4-4,5	4,6-4,0	<4,0

Tabel 4. Lanjutan.

Ketersediaan unsur hara (lapisan tanah permukaan)				
N total	sedang	rendah	sangat rendah	sangat rendah
P_2O_5 tersedia	sangat tinggi	tinggi	sedang-rendah	sangat rendah
K_2O tersedia	rendah	rendah	sangat rendah	sangat rendah
Salinitas (lapisan tanah bawah, mm hos/cm)	<3	3,1-5	5,1-8	>8
Kemiringan lahan (%)	0-3	3-5	5-8	>8

Catatan: S1 = sesuai; S2 = kesesuaian sedang; S3 = kesesuaian marjinal; N = tidak sesuai
Struktur tanah bukan faktor yang menentukan kesesuaian lahan, karena struktur aslinya rusak akibat pengolahan tanah pada tanaman lahan basah (padi) dan lahan kering (palawija setelah padi)

Sumber: CSR-FAO (1983)

Tabel 5. Contoh kesesuaian lahan untuk kedelai.

Karakteristik lahan	Nilai kesesuaian			
	S1	S2	S3	N
Suhu rata-rata (°C)	25-28	29-35 20-25	36-38 18-19	>38 <18
Curah hujan (mm/th)	1.500-2.500	1.000-1.500	2.500-3.500 700-1.000	>3.500 <700
Curah hujan selama musim tanam kedelai (mm/3 bln)	300-400	250-300 400-500	200-250 500-700	<200 >700
Ketersediaan irigasi pada musim kemarau	5-6 kali pengairan	4 kali pengairan	2-3 kali pengairan	1 kali pengairan
Tekstur tanah	- lempung - lempung berliat - lempung berdebu, - lempung liat berdebu	- lempung berpasir - liat berpasir	- pasir berlempung, liat berdebu	- pasir - kerikil - liat padat
Drainase tanah	baik	sedang	agak lambat agak cepat	sangat cepat sangat lambat

Tabel 5. Lanjutan.

Kedalaman lapisan olah (cm)	>50	30-49	15-29	<15
Bahan organik tanah	tinggi-sedang	sedang	rendah	rendah
Kemasan tanah (pH)	5,8-6,9	5,0-5,8	4,5-5,0	<4,5 >7,0
N tanah	tinggi-sedang	sedang	rendah	rendah
P_2O_5 tersedia	tinggi	sedang	rendah	rendah
K_2O tersedia	tinggi-sedang	sedang	rendah	rendah
Ca, Mg	tinggi	sedang	rendah	rendah
Kejenuhan Al	<5	5-10	10-15	>15
Topografi	datar	5-10%	10-20%	>20%
Naungan	tanpa	<10%	10-20%	>20%
Elevasi (m dpl)	100-800	800-1.200	1.200-1.500	>1.500

Sumber: CSR-FAO (1983)

Di antara penciri kesesuian lahan unsur iklim (suhu) tidak dapat dikendalikan; curah hujan dimanfaatkan sedangkan penciri lainnya dapat dimodifikasi. Modifikasi dan pemanfaatan curah hujan berupa sistem irigasi dan ketersediaan air *on-farm*, penulis bahas dalam buku khusus mengenai sistem irigasi.

Unsur iklim utama

Pada iklim tropik basah Huke (1976) tidak menganggap suhu sebagai faktor pembatas produksi komoditas pertanian, dalam pola tanam berbasis tanaman padi.

1. Curah hujan

Di wilayah yang paling kering jumlah curah hujan tahunanpun masih jauh lebih tinggi dari jumlah curah hujan di wilayah sub-tropika. Fluktuasi curah hujan (intensitas dan distribusinya dalam setahun) yang sulit diprakirakan, justru merupakan penyebab dari ketidak pastian keberhasilan program intensifikasi pertanian.

Balitklimat (2003) membuat Atlas Iklim Pertanian Indonesia, skala 1: 1.000.000, untuk digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan tentang pola tanam dan komoditasnya.

Lingkungan perakaran

2. Drainase internal tanah

Drainase internal tanah (*internal drainage*) dalam tanah ditentukan oleh banyak faktor ~ tekstur tanah, kandungan bahan organik. Indikator dari drainase internal adalah infiltrasi (aliran air dari permukaan menuju lapisan tanah dangkal, sebagai pemicu dari aliran air ke lapisan yang lebih dalam untuk memperkaya air tanah (*ground water*) dan memperdangkal muka air tanah (*water table*).

3. Kedalaman lapisan olah

Kedalaman lapisan olah ditentukan oleh kondisi fisik tanah pada lapisan terkontrol (lihat Gambar 7). Lapisan olah memfasilitasi pertumbuhan akar untuk mencapai bagian tanah yang lembab, maka memudahkan akar tanaman menjerap unsur hara.

Tanah akan mudah diolah dan akar juga mudah menembus bagian tanah yang lebih lunak atau gembur. Salah satu syarat agar tanah lunak dan gembur adalah kelembaban dari tanah. Faktor yang menandakan kemudahan tanah diolah dan ditembus akar, adalah:

- Berat jenis tanah (*bulk density*)
  - massa tanah (berat) per unit volume dari tanah; *bulk* yang dimaksud adalah tanah mineral padat dan pori-pori tanah
  - tanah yang gembur, lepas dan poros (*porous*) lebih ringan dari tanah yang kompak/padat

- tanah berpasir yang kandungan bahan organiknya rendah lebih berat dari tanah yang gembur
- struktur tanah granuler mempunyai berat jenis yang lebih rendah

$$\text{Berat jenis tanah} = \frac{\text{Berat tanah (g)}}{\text{Volume tanah (cm}^3\text{)}}$$

- Berat jenis pertikel tanah (*particle density*)
  - massa partikel tanah (berat) per unit volume dari partikel tanah (massa partikel tanah adalah partikel tanpa pori-pori tanah)

$$\text{Berat jenis partikel tanah} = \frac{\text{Berat partikel tanah (g)}}{\text{Volume tanah (cm}^3\text{)}}$$

- Pori-pori tanah mineral
  - pori-pori tanah mineral adalah rongga-rongga di dalam berisi udara atau air
  - tektur tanah medium yang mengandung bahan organik tinggi, pori-pori tanah per unit volume akan tinggi

$$\%\ \text{massa pada tanah} = \frac{\text{Berat jenis tanah}}{\text{Berat jenis partikel tanah}} \times 100$$

  - % pori tanah + % massa padat tanah = 100
  - % pori tanah = 100 - % massa padat tanah

$$\%\ \text{pori tanah} = 100 - \frac{\text{Berat jenis tanah}}{\text{Berat jenis partikel tanah}} \times 100$$

- Klasifikasi pori-pori tanah

Berdasarkan ukuran dan fungsinya, Baver (1966) membedakan pori-pori tanah, yang sangat berpengaruh terhadap kemampuan

tanah menyimpan air, penekanan erosi pada lahan berlereng dan dampak positifnya, seperti sedimentasi sungai dan waduk dan banjir pada MH atau kekeringan pada MK. Berdasarkan ukurannya dibedakan:

- pori-pori non-kapiler ~ berukuran relatif besar, menampung air hujan, tetapi air cepat kering setelah hujan reda; air tersebut merembes ke lapisan tanah yang lebih dalam disebut perkolasi.
- pori-pori kapiler ~ ukuran halus, berisi udara dan air hujan, tetapi air tersebut masih bertahan setelah hujan reda, bahkan setelah pori-pori non-kapiler mengering; status air pada kondisi demikian disebut kapasitas lapang (*field capacity*);
  - tanah jenuh air = 100% pori-pori tanah berisi air
  - regim air tanah pada kapasitas lapang: 40-60% pori-pori tanah berisi air

Dalam praktek pertanian pergerakan air dalam pori tanah disebut drainase internal (*internal drainage*).

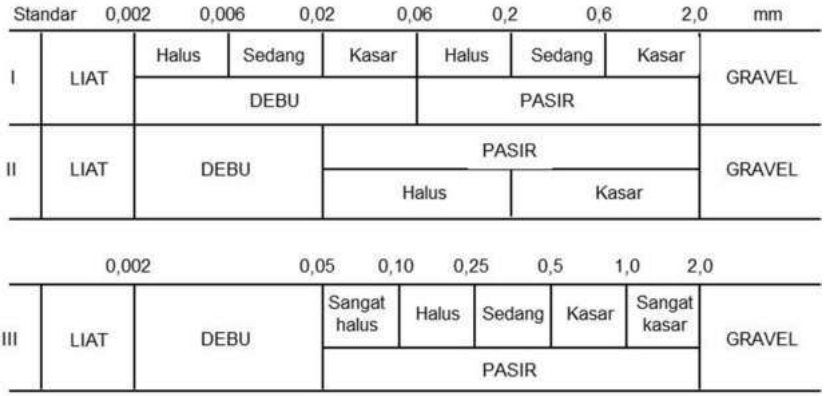
Kesuburan tanah

4. Tekstur

Tanah mineral merupakan kumpulan dari butiran-butiran tanah dari berbagai ukuran. Berdasarkan ukuran (diameter) butiran-butiran itu digolongkan ke dalam pasir, debu dan liat (Gambar 8). Ukuran butiran bukan ciri dari jenis tanah tertentu.

Kotak 2 : Definisi tekstur tanah

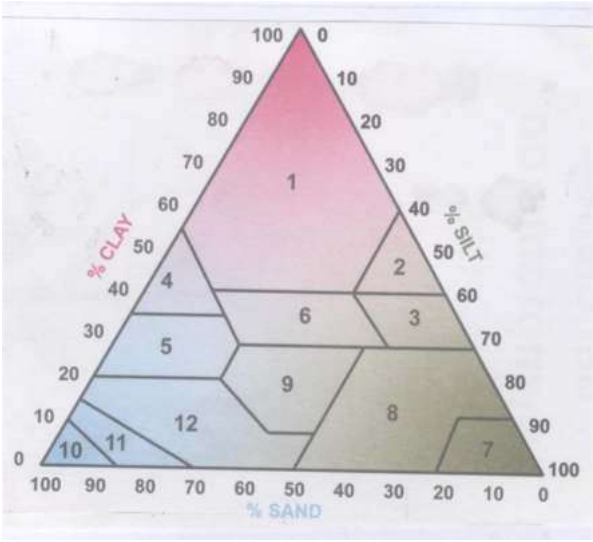
Tekstur tanah adalah proporsi relatif (%) dari berbagai ukuran butiran-butiran (partikel) dari tanah (pasir, debu, liat)



Keterangan:
I Standar Lembaga Inggris
II Standar Asosiasi Ilmu Tanah Internasional
III Standar USDA

Gambar 8. Klasifikasi butiran (partikel) tanah berdasarkan ukuran dari 3 sistem.
Sumber: Brady (1974)

Setelah data berat pertikel liat, debu dan pasir diketahui persentasenya, data tersebut diinterpretasi dengan menggunakan segitiga tekstur, yang menunjukkan interelasi antara persentase pasir, debu dan liat (Gambar 9).



1: clay	: liat
2: silty clay	: liat berdebu
3: silty clay loam	: lempung liat berdebu
4: sandy clay	: liat berpasir
5: sandy clay loam	: lempung liat berpasir
6: clay loam	: lempung liat
7: silt	: debu
8: silt loam	: lempung debu
9: loam	: lempung
10: sand	: pasir
11: loamy sand	: pasir berlempung
12: sandy loam	: lempung berpasir

Gambar 9. Distribusi persentasi kandungan liat, debu dan pasir dalam tanah sebagai indikator dari tekstur tanah.
Sumber: Brady (1974); Canpotex (2009)

Cara menggunakan segitiga tekstur:

(1) tentukan % kandungan debu (*silt*) pada garis debu dan % kandungan liat (*clay*) pada garis liat;

(2) buat garis masuk ke dalam segitiga dari titik % debu paralel dengan garis liat, dan dari titik % liat paralel dengan garis pasir;

(3) titik temu kedua garis pada area segitiga tekstur adalah nama dari tekstur tanah yang dipelajari.

Tekstur tanah, terutama partikel liat, dan regim air dalam tanah (kering, lembab, basah) menentukan daya adhesif dan kohesif antara partikel tanah yang berpengaruh terhadap pengolahan tanah, dan pengolahan tanah adalah penentu kemampuan akar tanaman menembus lapisan tanah. Dasar yang digunakan dalam menentukan kemudahan pengolahan tanah adalah konsistensi tanah (*soil consistency*). Baver (1966) membedakan 4 macam konsistensi tanah, yaitu:

Kondisi kering

(1) Konsistensi keras (*hard consistency*) ~ kelembaban tanah sangat rendah, tanah kering dan membentuk bungkahan-bungkahan.

Kondisi lembab

(2) Konsistensi lunak atau remah (*soft, friable consistency*) ~ kelembaban optimum, maka mudah untuk diolah.

Kondisi basah

(3) Konsistensi plastis (*plactic consistency*) ~ gambaran dari tanah yang teguh dan dapat digulung atau dibentuk

(4) Konsistensi lengket (*sticky consistency*) ~ partikel tanah saling mengikat, tetapi ikatannya tidak sekuat No. 3, maka tanah dapat lengket pada berbagai benda padat.

(5) Konsistensi lunak (*soft consistency*) ~ tanah friabel, mudah terangkut oleh aliran air, tanah mudah diolah dan dilumpurkan.

Pelumpuran tanah pada 3 macam konsistensi tanah dalam keadaan basah menghasilkan 3 macam kualitas lumpur (Fagi dan De Datta, 1983). Kualitas lumpur ini tidak dipertimbangkan dalam dinamika reaksi kimia tanah pada kondisi tanah sawah tergenang (submergence). Menurut Atterberg dalam Baver (1966) kelembaban maksimum sebagai indikator dari kemudahan pengolahan tanah, disebut *Atterberg limits, shrinkage limit, plastic limit dan liquid limit*.

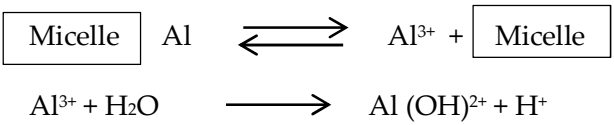
5. Kapasitas Tukar Kation

Partikel tanah yang paling aktif kaitannya dengan ketersediaan unsur hara adalah dalam bentuk koloid. Batas atas ukuran dari koloid <0,001 mikron (μ). Ukuran koloid yang digunakan sebagai koloid aktif adalah 0,2-0,02 μ. Ukuran yang memenuhi syarat sebagai koloid aktif adalah partikel liat (lihat Gambar 8). Dua kelompok liat dalam tanah adalah liat silikat (*silicate clays*) dan *iron – aluminium hydrous oxide clays* (Brady, 1974).

Koloid mineral liat

Koloid dari mineral liat berupa kristal dalam bentuk lempengan (*sheet*) yang berlaminasi. Bentuk dan ukurannya tergantung pada kondisi saat terbentuknya koloid liat tersebut. Karena ukurannya sangat halus, maka permukaan luarnya (*external surface*) sangat luas. Lempengan-lempengan itu bertumpuk-tumpuk, diantara tumpukan itu terbentuk permukaan dalam (*internal surface*).

Koloid liat secara individual disebut sel-mikro (microcell) atau micelles yang bermuatan listrik negatif. Maka, unsur hara dalam bentuk kation yang bermuatan positif tertarik ke permukaan dari micelles tersebut. Bersamaan dengan kation, molekul air ikut terikat yang mengalami hidrasi. Contoh dari hidrasi:



Menurut Brady (1974), di wilayah yang beriklim basah jumlah kation yang terikat berturut-turut adalah H^+, Al^{3+}, Ca^{2+} diikuti oleh Mg^{2+}, kemudian oleh K^+ dan Na^+.

Umumnya silikat liat terdiri atas alumina silikat. Ikatan silikat (Si) dan alumunium (Al) disebut *crystal lattice*; dibedakan berdasarkan perbandingannya.

- Si : Al = 1 : 1
  - mineralnya adalah kaolinit, halloysit, anauxit; Si dan Al dihubungkan oleh atom oksigen.
  - atom oksigen memperkuat ikatan Si dan Al, maka mineral ini tidak mudah mengembang/ membengkak (*expand*) di saat basah dan juga tidak mudah pecah.
  - ion hidrogen (H^+) dalam molekul air diantara Si dan Al menambah kuat ikatan Si dan Al, karena *hidrogen bonding*.
  - kohesi, pengerutan (*shrinkage*) saat kering dan pembengkakan (*swelling*) saat basah dari kaolinit sangat rendah.
- Si : Al = 2 : 1
  - lapisan Al dijepit oleh dua lapisan Si; mineralnya adalah: montmorillomit, vermiculit, beidelit, nontronit, dan saponit.
  - molekul air terikat di antara lapisan Si dan Al (dua ikatan molekul air) menyebabkan ikatan Si dan Al tidak kuat, maka mineral ini mudah mengerut saat kering dan membengkak saat basah.

- Si : Al = 2 : 1 (tidak mengembang) - mineralnya adalah illit dan mika; ukurannya lebih besar dari montmorillomit.
  - ion K+ (bukan air) mengisi relung-relung kristal antara Si dan Al, membuat illit tidak mudah membengkak dan mengerut.
- Mineral 2 : 2 - mineralnya silikat, tipe ini adalah klorit yang berupa silikat magnesium; lapisannya berupa alterasi talk (seperti unit kristal montmorillonit) dan brucit $Mg(OH)_2$; lapisan utamanya adalah 2 lapisan silika dan 2 lapisan magnesium.
  - kapasitas tukar kationnya sama dengan illit, tetapi lebih rendah dari montmorillonit atau vermiculit.
  - kristal ini juga bersifat tidak mengembang/ membengkak saat basah.

Penyebab muatan negatif pada mineral liat silikat

Setidaknya ada dua penyebab dari muatan negatif pada partikel mineral liat silikat: pertama, valensi yang tidak terpenuhi pada patahan pinggiran lembaran silika dan alumina; fenomena ini adalah penyebab dari *permanent charge* (muatan permanen); kedua, permukaan luar dari mineral liat, menampilkan oksigen (O) dan hidroksil (OH) yang bermuatan negatif; oksigen dan hidroksil itu terikat pada atom silicon dan aluminium pada pinggiran lempengannya. Brady (1974) mengilustrasikan dalam gambar; fenomena ini penyebab dari *pH dependent charge* (muatan negatif yang dipengaruhi oleh pH).

∇ *pH dependent charge*

Ikatan antara oksigen dan hidrogen dalam hidroksil (OH) merupakan ikatan kovalen (*covalent bonding*). Pada pH tinggi keterikatan H pada O dalam *covalent bonding* sangat lemah. Maka,

hidrogen dari hidroksil mudah terdisosiasi dan muatan pada permukaan koloid menjadi negatif dari oksigen (O^-); ion H^+ pada pH ≥ 6 dapat digeser oleh kation seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+}.

Pada tanah dengan kemasaman sedang sampai tinggi (pH agak rendah sampai rendah) ion H^+ terikat kuat dalam hidroksil (*covalent bonding* kuat), maka ion H^+ tidak mudah digeser oleh kation lain. Mineral liat 1 : 1 (kaolinit) mempunyai karakteristik seperti ini; kaolinit bersifat elektronegatif yang kuat (Brady, 1974) yang menyebabkan kapasitas adsorpsinya rendah. Patahan dari mineral liat 2 : 1, sebagian bersifat seperti kaolinit (Brady, 1974).

∇ *permanent charge*

Pada pinggiran patahan lembaran kristal liat (*cristal lattice*) monmorillonit (mineral liat 2 : 1) dapat terjadi sunstitusi satu ion Mg (Mg^{2+}) terhadap satu ion Al (Al^{3+}), karena Mg dan Al mempunyai diameter ion yang sama. Substitusi itu terjadi pada lapisan oktahedral (satu ion Al dikelilingi oleh 6 atom oksigen atau hidroksil); substitusi demikian disebut *isomorphous substitution* (Brady, 1974).

Akibat dari substitusi Mg^{2+} terhadap Al^{3+}, terjadi kelebihan muatan positif, yang tidak dipenuhi oleh 3 muatan negatif dari oksigen dan hidroksil. Maka, lapisan oktahedral mempunyai satu muatan negatif pada setiap substitusi Mg^{2+} terhadap Al^{3+}. Muatan negatif ini dapat diisi oleh Na^+ atau K^+.

Alasan yang sama tentang terjadinya muatan negatif pada lapisan tetrahedral dari liat silikat kalau Al (Al^{3+}) disubstitusi oleh Si (Si^{4+}), seperti ditunjukkan dalam ilustrasi berikut.

$O^{2-}\ Si^{4+}\ O^{2-}$	$O^{2-}Al^{3+}\ O^{2-}$
Tidak ada substitusi; tidak ada muatan negatif tersisa	Kalau Al^{3+} mensubstitusi Si^{4+}, ada satu muatan negatif

Substitusi isomorfik pada kristal mineral liat yang menyebabkan muatan negatif terjadi pada semua pH. Muatan negatif yang terjadi disebut *permanent charge*. Mineral liat vermikulit berperilaku seperti monmorillonit.

Koloid organik

Pada kondisi alami, jaringan tanaman daun, ranting/dahan dan akar tanaman perdu, rumput dan tanaman asli, setiap tahun menyumbang sejumlah besar residu organik ke dalam tanah. Sebagian tanaman budidaya diangkut saat panen, tetapi residunya (daun dan akar) tertinggal di dalam tanah. Setelah residu tanaman pada permukaan tanah terdekomposisi dan dicerna oleh mikroba tanah, ikut infiltrasi air atau terbenam oleh pengolahan tanah, kemudian membentuk lapisan tanah (horizon) atau tercampur dengan mineral tanah. Hewan dan mikroba tanah adalah sumber sekunder dari bahan organik tanah (Brady, 1974).

Berdasarkan beratnya, bahan organik kering mengandung karbon (C) dan oksigen (O), sebagian kecil hidrogen (H) dan serbuk/abu (ash). Tetapi berdasarkan elemen (jumlah atom), hidrogenlah yang dominan; ada 8 atom hidrogen dalam setiap 3,7 atom karbon dan 2,5 atom oksigen (Brady, 1974). Unsur lain yang dikandung dan berguna bagi pertumbuhan mikroorganisme adalah nitrogen, sulfur, fosfor, kalium, kalsium dan magnesium.

Elemen organik yang terdekomposisi adalah:

- gula dan tepung
- protein
- hemisellulosa
- sellulosa
- lignin, lemak, lilin (wax)

Pembusukan dan perombakan bahan organik merupakan proses pembakaran.

$$-[C-4H] + 4\,O_2 \xrightarrow[\text{oksidasi}]{\text{enzim}} CO_2 + H_2O + \text{energi}$$

Sebab itu dalam proses pembusukan dan perombakan tumpukan bahan organik, tumpukan itu menjadi panas. Produk dari dekomposisi bahan organik, adalah:

- karbon: CO_2, CO_3^{2-}, HCO_3^-, CH_4 (metana)
- nitrogen: NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, N_2 (proses nitrifikasi dan denitrifikasi)
- sulfur: S, H_2S, SO_3^{2-}, CS_2
- fosfor: $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}
- lainnya: H_2O, O_2, H_2, H^+, OH^-, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, dsb.

Dekomposisi bahan organik menghasilkan dua jenis senyawa organik di dalam tanah: (1) senyawa yang lambat atau tak mudah terdekomposisi, dan (2) senyawa baru, seperti polisakarida dan poliurodina. Kedua jenis senyawa itu adalah kerangka dasar dari humus.

Bentuk senyawa humus (*humic substance*) bereaksi dengan nitrogen, dan menjadi bagian integral dari kompleks humus. Terlepas dari bagaimana mekanisme terikatnya nitrogen, resultante dari produknya, yaitu humus baru yang tak mudah terdekomposisi lanjut oleh mikroorganisme.

Dari uraian singkat diatas, dua fakta yang nyata, yaitu: (1) humus adalah campuran dari senyawa komplek, (2) senyawa yang tersintesis dalam jaringan mikro yang tertinggal ketika mikroorganisme itu mati. Dari dua fakta tersebut humus dirumuskan (Kotak 3),

Kotak 3 : Rumusan humus

Humus is a complex and rather resistant mixture of brown or dark amorphous and colloidal substance modified from the original tissues or synthesized by the vorious soil organisms

Brady (1974)

Humus di dalam tanah sebagai komplek koloid bersifat sama dengan mineral liat silikat. Komplek koloid tersebut berfungsi seperti kompleks micelles, tetapi tidak terbentuk silika, oksigen, alumunium dan besi seperti kristal liat silika; micelle dari humus terbentuk dari karbon, hidrogen, oksigen dan sedikit nitrogen, sulfur, fosfor, dll. Muatan negatif dari micelle humus berasal dari -COOH dan -OH. Sebagian dari hidrogen dapat bertukar dengan kation. Micelle humus, sebagaimana partikel liat, dapat mengikat Ca^{2+}, H^{+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, dsb. Sebagai contoh (Brady, 1974).

$$KAlSi_3O_8 + H - \boxed{\text{Humus}} \rightarrow HAlSi_3O_8 + K - \boxed{\text{Humus}}$$

Microcline Silikat masam K teradsorpsi

Pengaruh bahan organik di dalam tanah terhadap sifat fisik dan kimia tanah secara garis besar, adalah:

(1) Berpengaruh terhadap warna tanah: coklat menjadi hitam
(2) Berpengaruh terhadap fisik tanah
    - granulasi butiran-butiran tanah
    - plastisitas, kohesi, dsb, berkurang
    - daya pegang air dari tanah naik
(3) KAK (Kapasitas Adsorpsi Kation) tinggi
    - dua sampai tiga puluh kali lebih besar dari koloid mineral
    - menyumbang 30-90% terhadap kemampuan adsopsi tanah mineral
(4) Penyediaan dan ketersediaan unsur hara
    - kation teradsorpsi mudah dipertukarkan
    - N, P dan S diikat dalam bentuk organik
    - ekstraksi elemen dari mineral oleh humus yang masam

Rasio antara karbon dan nitrogen dalam bahan organik dari lapisan olah tanah pertanian berkisar C/N = 8/1 atau 15/1; rata-rata

10/1dan 12/1. Pengetahuan tentang hal ini penting dalam mengembangkan skema pengolahan tanah.

Analisis KTK dan karakteristik lain

Kapasitas Tukar Kation (KTK) disebut juga Kapasitas Adsorpsi Kation (KAK). Jackson (1973) menunjuk beberapa metode analisis KTK atau Cation Exchange Capacity (CEC) seperti berikut:

- Teknik pencucian: tanah dan koloid dicuci (leaching) dengan 1 N larutan garam ($CaCl_2$) pada pH netral atau sedikit basa; bahan untuk buffer adalah NaOAc
- Teknik kimiawi
  - determinasi dengan natrium (Na^+): contoh tanah 4 gram untuk tanah bertekstur sedang dan halus, 6 gram contoh tanah untuk yang bertekstur kasar; contoh tanah di masukkan ke tabung sentrifugal, dicampur dengan 33 ml NaOAc pada pH 8,2.
  - determination dengan amonium (NH_4^+): metode ini tidak sepenuhnya dapat melepas ion H^+ yang terikat kuat pada mineral liat kaolinit dan halloysit; bahan untuk melepas ikatan ion H^+ adalah NH_4OAc pada larutan etanol 80%.
  - determinasi dengan mangan (Mn^{2+}): contoh tanah 10-80 mg; hasil determinasi ekuivalen dengan pelepasan keterikatan Ca^{2+}; perhitungannya:

$$\text{me KTK/100 g tanah} = \frac{\text{ppm Mn}}{274{,}7} \times \frac{\text{total larutan } HM_nO_4 \text{ (ml)}}{\text{berat contoh tanah (g)}}$$

- determinasi dengan barium (Ba)	efektif digunakan pada tanah berkapur (*calearеous soils*); ekstraksi dengan $BaCl_2$ yang dibaffer dengan trietanolamin; ekstraksi dapat juga dengan $Ba(OAc)_2$; untuk emisi dengan flame photometer digunakan NH_4OAc.

KTK dari humus dan beberapa mineral liat utama yang mendapat perhatian dalam pembahasan program intensifikasi padi dan palawija ditunjukkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Nilai KTK dari humus dan mineral liat 2:1 dan 1:1.

Humus dan mineral liat	Nilai KTK (meq/100 g tanah)
Humus	100-300
Montmorillonit	100
Vermikulit	160
Illit	30
Kaolinit	10

Sumber: Istiqlal Amien (1994)

Penjelasan tentang miltiequivalen:

KTK diekspresikan dalam equivalen atau lebih spesifik dalam miliequivalen (meq) per 100 gram. Definisi equivalen, adalah:

- 1 gram berat atom dari hidrogen atau banyaknya ion unsur apa saja yang dapat berkombinasi atau menggeser sejumlah atom hidrogen.
- berat dalam miliequivalen dari satu senyawa adalah seperseribu dari berat atomnya.
- Karena berat equivalen dari hidrogen sekitar 1 gram, maka miliequivalen (meq) adalah 1 miligram dari hidrogen atau banyaknya ion apa saja yang dapat bergabung atau yang dapat menggeser hidrogen itu.

Untuk ion monovalensi seperti Na^+, K^+, NH_4^+ dan Cl^-, berat equivalen dan berat atomnya adalah sama, karena ion-ion itu dapat menggeser atau bereaksi dengan satu ion H^+. Divalen kation seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} dapat menggeser 2 ion H^+. Maka, berat atom Ca^{2+} dan Mg^{2+} harus dibagi 2 untuk memperoleh berat equivalennya.

Contoh dalam praktek dijelaskan sebagai berikut:

Kalsium (Ca) mempunya berat atom = 40, sementara hidrogen (H) adalah 1. Ion Ca mempunyai valensi 2 (Ca^{++}) atau dapat mengikat 2 H^+. Maka banyaknya Ca yang diperlukan untuk menggeser 1 mg hidrogen adalah 40/2 atau 20 mg Ca; 20 mg Ca ini adalah 1 meq Ca. Apabila 100 gram suatu mineral liat dapat menarik 250 mg Ca, KTK dari mineral liat itu adalah 250/20 meq atau 12,5 meq per 100 gram mineral liat tersebut.

Pengetahuan tentang meq dapat digunakan atau dasar perhitungan kebutuhan kapur ($CaCO_3$). Teori dan perhitungannya diuraikan dalam Bab IX tentang uji tanah. Brady, 1974 menjelaskan tentang meq secara lebih rinci.

6. pH tanah

pH adalah indikator dari reaksi larutan tanah yang diukur dengan pH meter. Larutan tanah adalah air di dalam tanah yang didalamnya terlarut unsur hara tanaman. Larutan tanah mengisi pori-pori makro dan mikro, maka tidak tersebar rata, kacuali pada lahan sawah irigasi yang tergenang air. Penguapan (evaporasi) air tanah mengurangi kandungan air tanah, maka meningkatkan konsentrasi bahan-bahan terlarut.

Reaksi larutan air (pH) dikelompokkan: masam (*acid*), netral (*neutral*), dan basa (*alcaline*), tergantung pada perbandingan ion H^+ dan OH^-. Dalam praktek yang dihitung adalah kandungan ion H^+

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]}$$

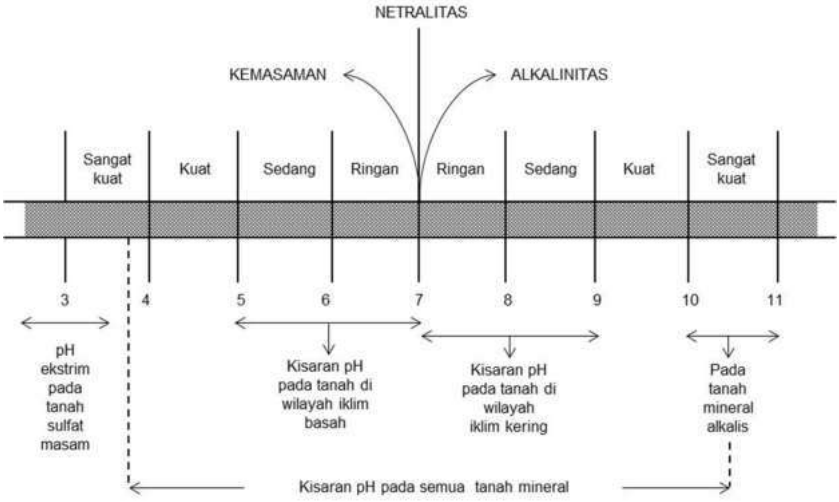
Konsentrasi ion H^+ berkaitan secara matematis dengan konsentrasi ion OH^-

$$[H^+] \times [OH^-] = 10^{-14} \text{ pada suhu } 25^oC$$

Pada pH = 6, konsentrasi ion $H^+ = 10^{-6}$ equivalen per liter, konsentrasi ion OH^-:

$$\frac{10^{-14}}{10^{-6}} = 10^{-8} \text{ per liter equivalen}$$

Di dalam tanah ion H^+ diadsorbsi oleh mineral liat lebih banyak dari ion OH^-. Klasifikasi pH tanah pada kondisi tanah masam, netral dan basa ditunjukkan dalam Gambar 10.



Gambar 10. Kisaran tingkat pH tanah mineral yang umum dijumpai pada wilayah iklim basah dan iklim kering.
Sumber Brady (1974)

pH tanah berpengaruh terhadap ketersediaan dan jerapan hara serta pertumbuhan tanaman melalui dua cara: (1) pengaruh langsung dari ion hidrogen, atau (2) secara tidak langsung melalui pengaruhnya terhadap ketersediaan unsur hara yang kalau berlebihan justru bersifat racun bagi tanaman.

- Pada pH ekstrem, konsentrasi tinggi ion hidrogen beracun, tetapi hampir semua tanaman dapat toleran asalkan unsur hara lain dalam keseimbangan.
- Hal seperti itu tidak selalu terjadi, karena beberapa unsur hara tertentu terpengaruh oleh pH tanah.
    - Fe, Mn dan Zn kurang tersedia kalau pH tanah naik dari 5,0 ke 7,5 atau 8,0.
    - Mo justru lebih tersedia pada pH yang lebih tinggi
    - P tidak siap tersedia dalam tanah, tetapi ikatan oleh mineral liat terhadap ion P menjadi kurang kuat pada pH = 6,5.
    - Pada pH <5,0, Al, Fe dan Mn larut dalam jumlah yang cukup banyak dan beracun bagi tanaman tertentu.
    - Pada pH tinggi, ion bikarbonat (HCO_3^-) cukup banyak dalam larutan tanah, dan mencegah jerapan yang normal dari ion unsur hara.

Beberapa contoh dari pengaruh tidak langsung dari pH tanah menunjukkan bahwa pH tanah adalah karakteristik penting dalam mendiagnosis masalah kesuburan tanah.

7. Unsur hara penting bagi tanaman

Dalam diskusi sebelumnya beberapa unsur hara penting dijadikan contoh untuk pembahasan. Tabel 7 menunjukkan unsur hara makro dan mikro, sumber dan bentuk ion (anion dan kation) yang dijerap oleh tanaman.

Tabel 7. Unsur hara makro dan mikro, sumber dan bentuknya (anion/kation) yang dijerap oleh tanaman.

Unsur hara dan sumbernya	Bentuk (anion/kation)
Dalam jumlah relatif banyak (unsur makro)	
Dari udara dan air	
- Carbon (C)	
- Hidrogen (H)	CO_2, O_2, H^+, OH^-
- Oksigen (O)	
Dari tanah (benda padat)	
- Nitrogen (N)	NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-
- Phosphor (P)	HPO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$
- Kalium (K)	K^+
- Kalsium (Ca)	Ca^{2+}
- Magnesium (Mg)	Mg^{2+}
- Sulfur (S)	SO_3^{2-}, SO_4^{2-}
Dalam jumlah relatif minimum (unsur mikro)	
Dari tanah (benda padat)	
- Besi (Fe)	Fe^{2+}, Fe^{3+}
- Mangan (Mn)	Mn^{2+}, Mn^{4+}
- Boron (Bo)	BO_3^{3-}
- Molybdenum (Mo)	MO_4^{2-}
- Tembaga (Cu)	Cu^+
- Seng (Zn)	Zn^{2+}
- Chlor (Cl)	Cl^-

Sumber: Brady (1974); Tisdale dan Nelson (1975)

Tisdale dan Nelson (1975) menambah panjang daftar unsur hara yang diperlukan tanaman dengan memasukkan natrium (Na), Vanadium (Va) dan silikat (Si):

- Vanadium:
  - unsur hara untuk ganggang hijau Scenedesmus
  - dapat mengganti molybden untuk *Azotobacter*
- Natrium:
  - diperlukan oleh tanaman *sugar beets*, sebagai pengganti kalium

- tanaman yang metabolisme karbon mengikuti jalur Hatch-Slack memerlukan unsur ini

- Silikon
  - belum diketahui peranannya dalam proses metabolisme dan fotosintesis.
  - berperan pada tanah yang mengalami degradasi di Jepang.

Kejenuhan basa (*base saturation*) adalah karakteristik penting dari tanah; didefinisikan sebagai persentase dari total KTK yang diisi oleh kation Ca, Mg, Na dan K (Tisdale dan Nelson, 1975). Proporsi dari kandungan keempat kation tersebut diketahui dari pencucian tanah dengan amonium asetat (NH_4OAc):

Ca = 0,02 g
Mg = 0,006 g
Na = 0,0115 g
K = 0,0195 g

Berat dalam miliequivalen dari Ca, Mg, Na dan K berturut-turut 0,02; 0,012; 0,023 dan 0,039, maka kandungan keempat basa dalam miliequivalen, adalah:

Ca	= 0,02/0,02	= 1 meq
Mg	= 0,006/0,012	= 0,5 meq
Na	= 0,0115/0,023	= 0,5 meq
K	= 0,0195/0,039	= 0,5 meq
Total		= 2,5 meq/20 gram tanah
		atau 12,5 meq/100 gram tanah

Kejenuhan basa berkaitan dengan pH tanah dan tingkat kesuburan tanah. Pada tanah ketersediaan dari kation utama itu bagi tanaman meningkat sejalan dengan tingkat dari kejenuhan basa. Sebagai contoh tanah dengan 80% kejenuhan basa lebih

mudah menyediakan kation bagi tanaman daripada kejenuhan basanya 40%. Hubungan antara kejenuhan basa dan ketersediaan kation bagi tanaman dipengaruhi oleh koloid mineral liat. Tanah yang mengandung bahan organik banyak atau koloid mineral liat didominasi oleh Si : Al = 1 : 1 dapat menyediakan kation jauh lebih rendah dari mineral liat 2 : 1.

Canpotex dan IPNI (2017) menginformasikan tentang metode analisis parameter karakteristik tanah yang digunakan secara internasional (Tabel 8).

Tabel 8. Garis besar analisis parameter karakteristik tanah.

Parameter	Unit	Metode
pH (air)	pH	1 : 1 (tanah : air)
pH (KCl)	pH	1 : 1 (tanah : 1 M KCl)
N Total	%	Kjeldah
C organik	%	Oksidasi basah (Walkley & Black)
P tersedia	mg/kg	Bray II (molybdenum biru), spektrofotometer
K dapat tukar	cmol/kg	I M NH_4OAc, pH 7, flame fotometer
Na dapat tukar	cmol/kg	I M NH_4OAc, pH 7, flame fotometer
Ca dapat tukar	cmol/kg	I M NH_4OAc, pH 7, atomic absorption spektrofotometer
Mg dapat tukar	cmol/kg	I M NH_4OAc, pH 7, atomic absorption spektrofotometer
Al dapat tukar	cmol/kg	I M KCl metode titrasi
H dapat tukar	cmol/kg	I M KCl metode titrasi
KTK efektif	cmol/kg	(K + Na + Ca + Mg + Al + H) dapat tukar
Kejenuhan Al	%	$\frac{\text{Al dapat tukar}}{\text{KTK efektif}} \times 100$
Pasir	%	pipet
Debu	%	pipet
Liat	%	pipet

Catatan: Metode lengkap dapat dilihat dalam Jackson (1973)

Sumber: Canpotex dan IPNI (2017)

8. Salinitas

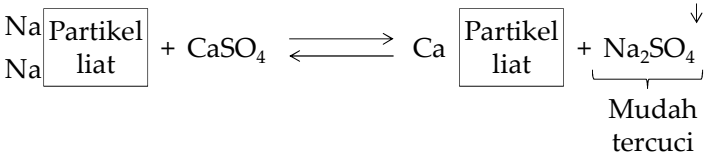
Kontaminasi tanah dengan garam (NaCl) merupakan salah satu kasus polusi lahan pertanian yang menyebabkan deteriorasi kesuburan tanah. Larutan garam yang masuk ke lahan pertanian bergerak menuju lapisan perakaran. Garam itu berasal dari air irigasi dan menyebabkana kandungan garam dalam tanah naik, terutama pada lahan yang drainasenya jelek. Salinitas dapat juga terjadi karena intrusi air laut ke dalam tanah (*ground water*), kemudian air yang mengandung garam itu naik ke permukaan tanah (lapisan perakaran). Kebun Pecobaan (KP) Jakenan, Balai Penelitian Lingkungan Pertanian (Balingtan), terletak hanya beberapa kilometer dari laut Jawa. Pada MK, air sumur di KP Jakenan menjadi asin dan pH tanah di lapisan perakaran naik.

Di wilayah yang beriklim basah sekalipun, salinitas dapat terjadi pada daerah yang padat penduduk dan daerah industri. Air buangan dari industri yang mengandung garam dibuang ke sungai yang airnya digunakan untuk mengairi lahan pertanian.

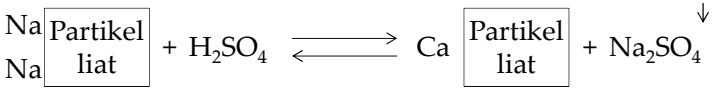
Ada tiga metode untuk menangani salinitas (Brady, 1974): (1) eradikasi, (2) konversi sebagian dari garam ke dalam senyawa yang tidak beracun, dan (3) pengendalian.

- Eradikasi
  - drainase dalam (*underdrainage*) dan pencucian/ penyiraman dengan tekanan kuat.
  - diikuti dengan irigasi dengan debit air tinggi berkali-kali; air irigasi harus jernih tidak keruh oleh debu (*silt*) dan harus mengandung garam natrium.
- Konversi
  - gunakan gips (gypsum) pada tanah sodic (*sodic soil*) untuk mengubah sebagian dari karbonat-alkali menjadi sulfat (beberapa ton gips diperlukan per hektar).

- tanah harus dalam keadaan basah untuk mempercepat reaksi dan gips disebar pada permukaan tanah (tidak dibenamkan ke tanah), kemudian dialiri air untuk pencucian.
- gips ($CaSO_4$) akan bereaksi dengan Na_2CO_3
- $Na_2CO_3 + CaSO_4 \rightleftharpoons Ca\,CO_3 + Na_2SO_4$



- kalau sulfur dalam $CaSO_4$ teroksidasi menjadi H_2SO_4 maka terjadi reaksi baru:
- $Na_2CO_3 + H_2SO_4 \rightleftharpoons CO_2 + H_2O + Na_2SO_4$



- Pengendalian

Penambatan evaporasi adalah cara yang efektif dianjurkan dalam pengendalian bahaya dari salinitas, tetapi cara ini mahal dipraktekkan pada kawasan yang luas. Metode lain yang dapat diterapkan, adalah:

- waktu pemberian air yang tepat; tanaman muda sensitif terhadap salinitas, maka air irigasi segera diberikan setelah bibit/benih ditanam untuk mentrasportasi garam ke lapisan tanah yang lebih dalam.
- pupuk kandang (pupuk organik), dianjurkan (koloid pupuk organik akan mengikat ion Na^+).
- tanam tanaman yang toleran terhadap salinitas dan alkalinitas, seperti sorghum, kapas dan sugar beets.

9. Kemiringan lahan

Relief adalah salah satu dari pembentuk tanah (Gambar 6) yang mencakup ketinggian dan kemiringan lokasi. Ketinggian lokasi terkait dengan kedalaman muka air tanah; makin tinggi lokasi, makin dalam muka iar tanah (*ground water*). Kemiringan paling berpengaruh terhadap besarnya erosi tanah, kalau lahan itu gundul. Tanah yang telah lama terbentuk menjadi muda kembali kalau erosi parah dan yang tertinggal adalah bahan induk lama yang belum mengalami pelapukan. Maka, kemiringan lahan adalah fokus dalam uraian berikut.

Prioritas utama pengelolaan lahan berlereng atau lahan miring adalah pengendalian erosi. Lahan miring berada di wilayah perbukitan dan pegunungan yang merupakan sumber air untuk berbagai keperluan ~ pertanian, industri dan domestik. Air dialirkan melalui sungai dan ada yang ditampung di dalam waduk. Sebab itu daerah perbukitan dan pegunungan dari kaki sampai puncak disebut Daerah Aliran Sungai (DAS). Pengelolaan DAS tanpa/mengabaikan kaedah konservasi akan menyebabkan erosi.

Kehilangan tanah di DAS oleh erosi diestimasi oleh Schwab et. al. (1966) dengan rumus:

$$Xa = IKLsCP$$

Di mana:

Xa = rataan kehilangan tanah (ton/are)
I = potensi erosivitas dari curah hujan tahunan
K = erodibilitas tanah (rataan kehilangan tanah (ton/are) per indeks erosi dari jenis tanah yang diolah dalam keadaan tidak ditanami terus menerus.
Ls = faktor topografi (makin miring, makin besar)
C = faktor pengelolaan pertanaman
P = faktor praktek konservasi

Rumus ini dikenal sebagai USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Penelitian-penelitian yang diselenggarakan oleh unit FSR & Conservation (*Farming Sistem Research & Conservation*) dari UACP berpedoman USLE.

Hasil-hasil penelitian Sistem Usahatani dan konservasi oleh tim FSR & Conservation (SUT Konservasi) dirumuskan dalam Tabel 9.

Tabel 9. SUT konservasi pada berbagai kombinasi kemiringan (lereng), kedalaman solum dan erodibilitas tanah.

Lereng (%)	Kedalaman tanah efektif atau solum					
	<40 cm		40-90 cm		>90 cm	
	Erodibilitas		Erodibilitas		Erodibilitas	
	Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah
<15	C	C	B	B	B	B
15-30	C	C	C	B	B	B
31-45	D	C	C	C	C	B
>45	B	D	D	D	D	D

Keterangan:
B, teras bangku ~ 75% tanaman pangan (tanaman semusim), 25% tanaman tahunan plus ternak
C, teras gulud ~ 25% tanaman pangan, 75% tanaman tahunan plus ternak
D, tanaman lorong menurut garis kontur, hampir 100% tanaman tahunan
Sumber: Fagi dan Mackie (1988); Abdurachman et. al. (1993)

Selain diversifikasi sistem usahatani, konservasi sumberdaya alam adalah komponen utama dari inisiatif ekoregional (Fagi, 2015). Sasaran dari penerapan teknik konservasi berbeda menurut ekosistem:

(a) padi sawah (air tergenang): mitigasi emisi CH_4 yang ditengarai berpengaruh terhadap memanasan global dan perubahan iklim.
(b) padi sawah pasang surut, tipologi sulfat masam: mempertahankan lapisan pirit dalam kondisi reduksi.
(c) padi gogo (lahan kering berlereng): menekan bahaya erosi.
(d) padi sawah tadah hujan: konservasi air runoff dalam embung.

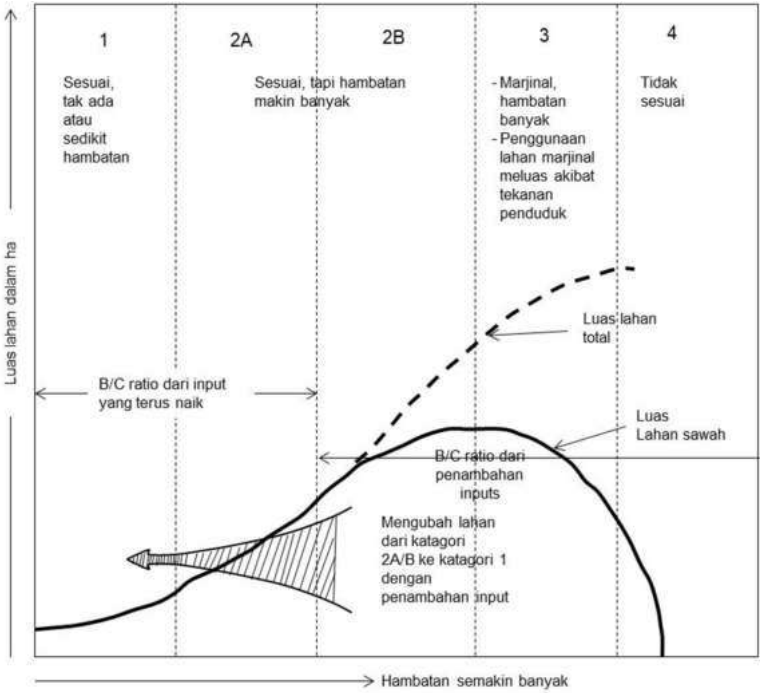
Sintesis

Uraian tentang karakteristik tanah tekstur, KTP, pH, unsur hara, salinitas dan kemiringan lahan sebagai penciri dari kesesuian lahan bagi komoditas pertanian adalah pedoman dalam menangani isu-isu nasional dalam Bab II. Sebagai contoh adalah kesesuaian lahan.

Moorman dan van Breemen (1978) menunjukkan dalam Gambar 11 bagaimana upaya yang tidak berlandaskan tuntunan ilmiah dapat berpengaruh negatif terhadap efisiensi biaya produksi kalau, misalnya pupuk organik dan anorganik digunakan tidak berdasarkan nalar yang sehat, dan terhadap keberlanjutan dari sistem produksi. Gambar 11 dapat diinterpretasi sebagai berikut:

- Luas lahan yang sesuai untuk padi sawah telah dibudidayakan semua secara intensif dan hasil padi mulai melandai karena keterbatasan potensi genetik varietas dan keterbatasan daya dukung lahan. Penambahan inputs betapapun banyaknya meningkatkan hasil gabah tetapi tidak proporsional dengan kenaikan jumlah inputs.
- Upaya untuk memacu laju kenaikan produksi padi adalah melalui program ekstensifikasi pada lahan kesesuaian sedang, selanjutnya ke lahan yang kesesuaiannya marjinal, karena lahan demikian masih cukup luas.
- Karena pada lahan dengan kesesuaian sedang dan marjinal lebih banyak masalah, maka diberi lebih banyak inputs agar hasil padinya sama dengan hasil padi pada lahan yang sesuai. Pemberian inputs dengan takaran yang sangat berlebihan akan menghasilkan B/C ratio <1,0; artinya usahatani padi yang tidak smart demikian justru merugikan petani, dan adopsi teknologi oleh petani tidak akan berlanjut. Selain itu akan menyebabkan kerusakan lingkungan akibat dari polusi air dan udara.

- Pengelolaan lahan berlereng di DAS tengah-hulu untuk padi gogo dan palawija tanpa penerapan kaedah konservasi akan meningkatkan erosi yang menimbulkan sedimentasi sungai dan waduk; daya tampung air dari sungai dan waduk menurun, maka luas area tanam/panen padi juga berkurang.



Gambar 11. Luas lahan pertanian produktif makin berkurang; upaya untuk meningkatkan hasil melalui program ekstensifikasi ke lahan yang kurang subur dengan teknologi intensif agar hasilnya setara dengan hasil pada lahan produktif (subur) akan menghasilkan B/C ratio <1,0.

Keterangan (padanan Gambar 11 dengan Tabel 4, 5.
1 = S1 → sesuai
2A, 2B = S2 → kesesuaian sedang
3 = S3 → kesesuaian marjinal
4 = N → tidak sesuai
Sumber: Moorman dan van Breemen (1978)

Pengetahuan tentang tekstur tanah yang menentukan KTK, ketersediaan unsur hara dan rejim air tanah berguna dalam memilih lokasi pertanaman kedelai dalam pola tanam padi-kedelai. Tabel 10 memberi arahan sebagai berikut:

- Tanaman padi sawah perlu genangan air. Air dalam petakan sawah akan tergenang kalau tanahnya bertekstur berat atau kandungan liat tinggi (63-77%). Pada kandungan liat tinggi, pupuk optimal, bebas serangan hama/penyakit, hasil gabah akan mencapai potensinya (100%).
- Tanaman kedelai perlu drainase yang baik. Hal ini akan tercapai pada tanah sawah yang bertekstur sedang (kandungan liat 28-35%).
- Untuk memperoleh hasil biji kedelai 100% dari potensial, kedelai harus ditanam pada lahan sawah yang hasil gabahnya hanya 80% dari potensial.

Tabel 10. Perbandingan indeks hasil biji/gabah pada berbagai kandungan liat untuk dipertimbangkan dalam pola tanam padi-kedelai.

Tanaman	Indeks hasil biji (% dari potensi hasil)				
	100	90	80	70	60
Kedelai					
- Kandungan liat tanah (5 μm, %)	36-43	26-51	21-63	15-68	13-72
- Kedalaman 48 cm					
Padi sawah					
- Kandungan liat tanah (5 μm, %)	63-77	36-63	28-35	23-27	15-18
- Kedalaman 48 cm					

Sumber: Fagi (1977)

Dalam program intensifikasi padi, seperti Insus dan Supra Insus pola tanam padi-palawija, padi-padi-palawija, palawija-padi-padi, dsb., masuk ke dalam paket teknologinya. Pada program Supra Insus, paketnya disebut paket-D Supra Insus. Dengan demikian palawija jagung atau kedelai dianjurkan

ditanam dengan tujuan untuk memotong siklus pertumbuhan hama padi. Jadi, jagung atau kedelai diperlakukan sebagai tumbal. Pada kondisi saat ini di mana produksi jagung dan kedelai juga akan ditingkatkan, maka posisi padi, jagung dan kedelai sama. Maka paradigma yang berkenaan dengan pola tanam berbasis padi harus diubah dengan mempertimbangkan uraian di atas (lihat Tabel 10).

IV
KLASIFIKASI JENIS TANAH

Sejak pertengahan abad ke-19 sampai pertengahan abad ke-20 banyak metode yang digunakan untuk mengklasifikasi tanah, mulai dari yang sederhana dan praktis sampai yang moderen, kompleks dan computerized. Tujuan dari klasifikasi jenis tanah, adalah : (1) mengorganisasikan pengetahuan dan data kaitannya dengan pemikiran ekonomis, (2) menunjukkan sifat-sifat dari tanah, (3) memahami hubungan antara ciri-ciri tanah satu dengan lainnya, (4) mempelajari adanya prinsip baru dari keterkaitan antara ciri-ciri tanah dan interaksinya, (5) mewujudkan pengelompokan ciri-ciri tanah ke dalam sub-divisi (kelas) yang berguna bagi budidaya komoditas pertanian, memprediksi sifat-sifatnya, mengidentifikasi kegunaannya yang terbaik, memperkirakan tingkat kesuburan dan produktivitasnya (kesesuaiannya), dan menjadikannya sebagai obyek penelitian dan perluasan atau ekstrapolasi dari hasil-hasil penelitian atau hasil observasi.

Sampai peta Tanah Eksplorasi Djawa & Madura skala 1 : 1.000.000 dicetak pada tahun 1960, Lembaga Penelitian Tanah (LPT) belum menunjukan metode apa yang digunakan dalam mengklasifikasi jenis tanah Indonesia. Para peneliti tanah di LPT ialah binaan dari ahli tanah Belanda. Buol *et al.* (1975) hanya mengiventarisasi metode yang digunakan di Rusia, Amerika Serikat, Eropa Barat, Perancis, Belgia, Inggris, Kanada, Australia dan Brazilia. Artinya penelitian tanah Belanda tidak secara jelas mempublikasikan metode yang digunakan di Indonesia.

LPT (1969) mendefinisikan jenis tanah sebagai segolongan tanah yang terbentuk dari proses pembentukan tanah yang sama.

Data dan informasi yang digunakan dalam klasifikasi tanah Indonesia setara dengan data untuk menetapkan Great Soil Group-Bodemtype (Soepraptohardjo, 1961, dalam LPT, 1969); lihat Kotak 4.

Kotak 4 : Great Soil Group
Subdivision of suborders according to similar kind, arrangement and degree of expression of horizons with emphasis on upper sequum : base status, soil temperature and moisture regimes, presence or absence of diagnostic layers (plinthite, fragipan, duripan).

Buol *et.al.* (1974)

Lapisan sebagai penciri (*diagnostic layer*) dari *Great Soil Group* diuraikan sebagai berikut:

- Plinthite : kandungan humusnya rendah, horizonnya kaya sesquioxide (oksida besi, alumunium dan mangan) yang dapat mengeras secara tidak berbalik menjadi lapisan kedap air dari batuan besi atau agregasi akibat terjadi kondisi air tanah basah-kering secara terus menerus, warna merah adalah bagian dari lapisan dengan bercak-bercak berwarna kuning, kelabu atau putih.
- Fragipan : lapisan bawah (*sub-soil*) dengan berat jenis tinggi, mudah hancur saat basah dan sangat keras saat kering, tidak lunak saat lembab, tetapi mudah pecah dari genggaman tangan; bungkahan yang kering udara terlapisi oleh endapan dalam air.
- Duripan : horozon di bawah permukaan tanah (*sub-surface*) setidaknya separuhnya mengeras oleh SiO_2; bungkahan kering udara tidak terlapisi oleh endapan dalam air.

Great Soil Group dirinci lagi menjadi *Sub-Group*, kemudian *family* dan *series*. Sampai tahun 1978, klasifikasi jenis tanah yang datanya sampai pada *Great Soil Group* masih digunakan oleh Soepraptohardjo dan Suhardjo (1978) untuk mengklasifikasikan jenis tanah sawah.

Klasifikasi dengan Metode Lama

Kalau ahli tanah Belanda yang bertanggung jawab dalam mengklasifikasi jenis tanah di Indonesia menggunakan data diagnose untuk *Great Soil Group*, maka data diagnose itu yang digunakan untuk membedakan kelas-kelas jenis tanah yang dinyatakan pada tahun 1960. Jenis tanah-tanah tersebut adalah (LPT, 1969):

Organosol

- Segolongan tanah campuran antara bahan organik dan tanah mineral; ketebalan bahan organik 30 cm, sekitar 30% pada tanah bertekstur liat atau 20% pada tanah bertekstur pasir dan selalu jenuh air.
- Tanah ini mudah terbakar, peka erosi, mudah mengerut saat kering, tetapi sekali kering tidak mudah basah; kesuburan tanah bergantung pada bahan asal.
- Sebaran utama di dataran rendah pada cekungan dan lembah, maka drainasenya jelek.
- Berasosiasi dengan tanah Aluvial dan Glei Humus.

Aluvial

- Segolongan tanah dengan sedikit atau tanpa perkembangan profil; terdiri atas bahan aluvial/koluvial lepas yang muda atau agak muda; kesuburan tanah bergantung pada bahan asal.

- Sebaran utama di dataran rendah pada cekungan dan lembah; dijumpai pada semua iklim (tipe curah hujan), berdarainase jelek, dan berasosiasi dengan jenis tanah lain.

Litosol

- Segolongan tanah tanpa perkembangan profil, solum dangkal dan tipis dengan bahan induk yang kokoh; kesuburan tanah bergantung dari bahan asal pada iklim yang variabel.
- Umumnya berasosiasi dengan Regosol (bahan vulkan) atau dengan Mediteran, Rensina dan Grumusol.
- Disebut juga sebagai tanah Laterit yang tererosi.

Regosol

- Segolongan tanah dengan sedikit atau tanpa perkembangan profil dari bahan induk lepas, bertekstur kasar (pasir >40% atau lempung), berwarna kelabu atau kelabu coklat, permeabilitas cepat dan peka erosi.
- Penyebaran di bukit lipatan, kerucut vulkan, beting pasir, pada iklim yang variabel, kesuburan tergantung bahan asal.
- Berasosiasi dengan Litosol, dan dengan Grumosol pada bukit lipatan.
- Disebut juga sebagai Vulkanis Ash Soil atau Margalit Soil yang tererosi.

Grumusol

- Segolongan tanah yang profilnya telah berkembang, berwarna kelabu sampai hitam, lapisan tanah atas kasar, lentur dan lengket bila basah, kokoh saat lembab dan keras saat kering. Horizon bawah bergumpal dengan *slickensides* dan kongkresi kapur/mangan.
- Permeabilitas lambat dan sangat peka erosi.
- Tersebar di dataran atau cekungan, di bukit-bukit lipatan dan di daerah karst, pada daerah beriklim basah (bulan kering > 3

bulan), berasosiasi dengan Aluvial, Regosol, Mediteran Merah-Kuning.

- Nama lain : tanah Margalit, Ranca Minyak, Renzina.

Andosol

- Segolongan tanah yang profilnya telah terbentuk, berwarna hitam-kelabu tua; horizon atas gembur, remah dan kaya bahan organik. Horizon bawah berwarna coklat-coklat kekuningan, miskin bahan organik, gembur, gumpal bersudut, adakalanya terdapat padas lunak (fragipan).
- Sifat fisik baik, sifat kimia sedang, permeabilitas sedang, sangat peka erosi.
- Tersebar pada semua kerucut vulkan dan kompleks vulkan pada ketinggian >1000 m, beriklim sedang.
- Berasosiasi dengan Regosol dan Latosol.
- Nama lain Tropical Brown Forest, Mountain Soil, Grey Brown Podzolic Soil.

Mediteran Merah-Kuning

- Segolongan tanah yang profilnya telah terbentuk, berwarna coklat hingga merah, horizon B bertekstur halus, bergumpal, gembur hingga padat.
- Sifat fisik sedang, sifat kimia agak kaya, kejenuhan basa tinggi, permeabilitas sedang dan peka erosi.
- Tersebar di pegunungan karst dan pegunungan lipatan padi iklim dengan bulan kering > 2 bulan.
- Berasosiasi dengan Grumusol, Litosol dan Regosol.
- Nama lain: Red Limestone Soil, Terra Rosa

Latosol

- Segolongan tanah yang profilnya telah berkembang, solum tebal, berwarna coklat hingga merah, tekstur halus, agak masam.
- Horizon B terdapat bercak-bercak (*mottling*) berupa kongkresi; di horizon C dijumpai plinthite.
- Sifat fisik baik, permeabilitas cepat, tahan erosi, sifat kimia sedang sampai kurus.
- Dijumpai di daerah beriklim basah, tanpa bulan kering pada lungur vulkan di pegunungan lipatan dan patahan.
- Berasosiasi dengan Andosol, Regosol, Litosol dan Podzolik Merah-Kuning.

Podzolik Merah-Kuning

- Segolongan tanah yang telah mempunyai profil yang berkembang, berwarna merah hingga kuning dengan horizon B yang kompak, bergumpal, berwarna kelabu; di horizon C terdapat plinthite.
- Sifat fisik jelek, sifat kimia kurus, masam, kejenuhan basa rendah; permeabilitas lambat, dan sangat peka erosi.
- Penyebaran di pegunungan lipatan dan di dataran yang berombak/bergelombang; umumnya berada di daerah tanpa bulan kering.
- Berasosiasi dengan Litosol dan Latosol; di dataran rendah berasosiasi dengan Hidromorf Kelabu.
- Nama lain: Podzolized Lateritic Soil, Degraded Lateritic Soil.

Hidromorf Kelabu

- Segolongan tanah yang profilnya telah terbentuk berwarna kelabu, horizon atas tercuci, horizon bawah bertekstur halus berbercak kuning hingga merah.
- Sifat fisik jelek, permeabilitas lambat, peka erosi.

- Sebaran di dataran rendah dan cekungan, maka berdrainase jelek; curah hujan cukup.
- Berasosiasi dengan Planosol dan Podzolik Merah-Kuning.

Planosol

- Segolongan tanah yang profilnya telah terbentuk dengan satu horizon atau lebih, horizon bawah bertekstur kontras, berkadar liat lebih tinggi dengan konsistensi kuat.
- Sifat fisik jelek, permeabilitas lambat sekali, sifat kimianya kurus, drainase jelek.
- Sebaran di dataran rendah dan cekungan dari topografi bergelombang/berombak.
- Berasosiasi dengan Hidromorf Kelabu.

Klasifikasi dengan Metode Baru

Buol *et. al*. (1975) membandingkan klasifikasi jenis tanah dengan metode baru dari berbagai negara mengacu pada metode yang digunakan di Amerika Serikat. Struktur dari sistem pengkelasan di Amerika Serikat terdiri atas 6 katagori dengan pencirinya (Tabel 11).

Tabel 11. Karakteristik dari penciri masing-masing katagori dalam mengklasifikasi jenis tanah di Amerika Serikat.

Katagori**)	Taksa*)	Karakteristik penciri
Order (ordo)	10	Proses pembentukan tanah yang diindikasikan oleh keberadaan atau ketiadaan horizon penanda utama (major diagnostic horizon)
Sub-order (Sub Ordo)	47	Keragaan genesis: subdivisi dari ordo berdasarkan keberadaan atau ketiadaan sifat-sifat yang berkenaan dengan kelembaban/kebasahan, regim tanah, bahan induk utama, dekomposisi bahan organik dalam bentuk serat
Great Soil Group (Kelompok Besar Tanah)	206	Subdivisi dari sub-ordo berdasarkan kesamaan bentuk dan tatanan dari horizon, terutama kejenuhan basa, suhu tanah, regim kelembaban tanah, keberadaan atau ketiadaan lapisan penciri: plinthite, fragipan, duripan
Sub-group (Sub Kelompok)		Konsep pokok dari taksa (taxa) dari Kelompok Besar dan sifat-sfat yang menunjukkan gradasi internal antara Kelompok Besar dengan sub-ordo dan ordo, dan gradasi eksternal ke bahan bukan tanah
Family (Famili)		Sifat-sifat penting untuk pertumbuhan akar, kelas tekstur secara umum, rata-rata pada lapisan terkontrol (control section) atau solum, suhu rata-rata tahunan pada kedalaman 50 cm
Series (Seri)	10.000 (perkiraan di Amerika Serikat	Macam tatanan dari horizon: warna, tekstur, struktur, konsistensi, pH dan sifat-sifat kimia dan minerologi dari horizon

Keterangan:
*) Taksa (taxa) = berasalal dari taxonomy adalah kelas-kelas dalam taksonomi
**) katagori (catagory) = serangkaian atau alur taksa dari generaliasi atau abstraksi populasi (tanah) yang tersusun dari kelas-kelas)
Sumber: Buol *et. al.* (1975)

Semua parameter karakteristik penciri diberi kode-kode. Penamaan kelas-kelas jenis tanah dengan menggunakan kode-kode penciri itu cukup rumit, tetapi ini adalah dasar dari *presciption/ precision farming*. Peta Tanah Explorasi skala 1:1.000.000

yang dicetak oleh Pusat Penelitian Tanah, menggunakan klasifikasi jenis tanah yang baru. Penciri umum dari kelas jenis tanah dengan metode baru ditunjukkan dalam Tabel 12.

Tabel 12. Ordo tanah dan kunci indikator utama (dilengkapi elemen pembentukan).

Ordo tanah	Elemen pembentukan	Kode	Implikasi kunci indikator ordo tanah
Vertisols	ert	invert	>50% liat sedalam 1 m ke agregat slickensides
Entisols	ent	recent	Tidak ada horizon penciri (diagnostic horizon), kecuali ochric, anthropic, albic, argic
Inceptisols	ept	inception	Tidak ada spodic, argillic, netric, oxic, petcalcic, plinthite, tetapi ada cambic atau histic
Aridisols	id	arid	Ochric atau argillic, tetapi tidak ada oxic atau spodic, umumnya kering
Spodosols	od	podzol, odol	Ada spodic
Utisols	ult	ultimate	Persen kejenuhan basa <35 pada kedalaman rata-rata 1,25 m; Sifat-sifat lainnya tersebar rata
Mollisols	olt	mollify	Ada mollic, tetapi tidak ada oxic
Alfisols	alf	pedafer	Semua soil mineral ada, tanpa oxic
Oxisols	ox	oxide	Ada oxic horizon
Histosols	ist	histology	>30% bahan organik pada kedalaman sampai 40 cm

Sumber: Buol *et. al.* (1975)

Keterangan indikator dari indikator kunci:

albic: horizon A_2, berwarna keputihan

argillic: horizon B, mempunyai 1, 2 kali lebih banyak liat dari horizon di atasnya dengan ketebalan 1/10 dari ketebalan horizon di atasnya

argic: horizon dengan liat berwarna putih

anthropic: horizon permukaan yang mengandung 250 ppm P_2O_5 larut dalam asam sitrat

cambic: horizon bawah (*subsoil*) dengan horizon argillic atau spodic yang lemah; kandungan liat kurang dari 1,2 kali horizon di atasnya

histic: horizon permukaan yang mengandung 20-30% bahan organik

mollic: horizon permukaan yang jika diaduk sampai kedalaman 17,5 cm mengandung >1% bahan organik

natric: horizon mirip argillic; lebih dari 15% KTK ditempati Na^+

oxic: ketebalan horizon sekurangnya 30 cm, mengalami pelapukan berat; kandungan tinggi mineral liat 1:1 dan sesquioxide mengikat <10 meg NH_4^+ dari IN NH_4Cl

ohric: horizon atas berwarna cerah dengan nilai warna >5,5 kering, warna >3,5 lembab, mengandung <1% bahan organik

petrocalcic: horizon calcic yang mengeras, kekerasannya ≥3 skala Mohs, ½ hancur dalam asam, tetapi tidak hancur dalam air

spodic: horizon terakumulasi sequioxide bebas dan bahan organik; banyak keterbatasan berkenaan dengan ratio Al, Fe, bahan organik dan liat, tergantung pada pengelolaan horizon di atasnya ~ masih asli atau dibudidayakan/diolah

Kalau jenis tanah diperkecil menjadi Sub-Group, Family sampai Series, lebih banyak lagi data yang harus diidentifikasi dan dikumpulkan. Sebagai contoh adalah kelas jenis tanah KP Sukamandi, BB Padi, di Kecamatan Ciasem, Subang, Jawa Barat:

Isothermic Vertic Tropaquuls

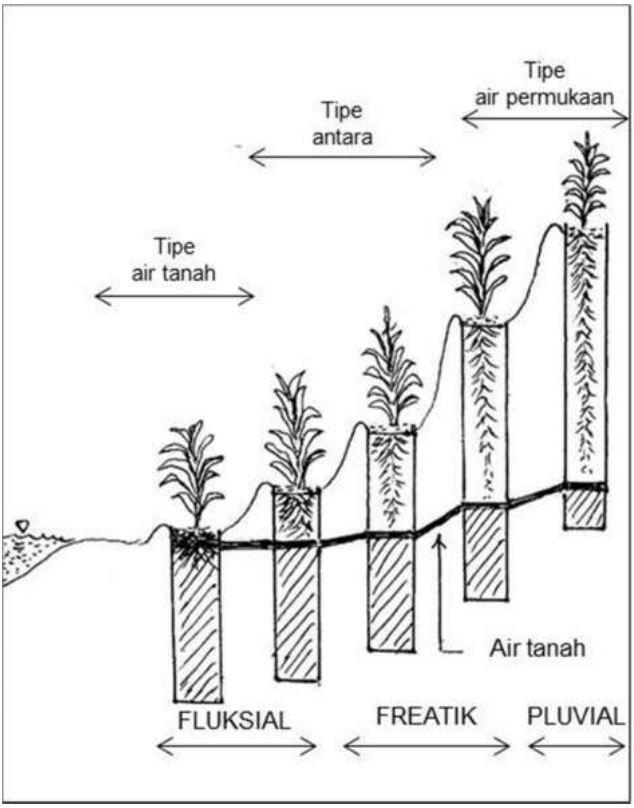
Ordo tanah	:	Ultisols (ults)
Aq → aqua	:	drainase lambat; perkolasi rendah
Trop → tropika	:	iklim tropika
Vertic	:	sifat fisik mirip tanah Vertisols yang permukaan tanahnya retak-retak saat kering
Isothermic	:	pada kedalaman sekitar 50 cm saat kering suhu tanah panas secara merata (iso)

Tanah Sawah

1. Toposequen lahan sawah dan pengaruhnya

Padi ditanam pada lahan dengan regim airnya sangat bervariasi mulai dari yang airnya menggenang terus (*water logged*), drainase jelek, sampai yang airnya cepat kering (*well drained*), pada berbagai topografi. Sebab itu kisaran karaketristik pedogenik dan morfologi tanah sawah sangat lebar (*considerable*). De Datta (1981) mengilustrasikan pengaruh toposequen terhadap profil tanah sawah (Gambar 12). Pada kondisi di mana petakan sawah selalu tergenang selama pertumbuhan tanaman, morfologi tanah sawah dapat berubah karena hal-hal berikut (De Datta, 1981):

- Senyawa besi dan mangan terlarut dalam air bergerak dari lapisan tanah atas dan mengendap di lapisan tanah bawah. Endapan besi dan mangan di lapisan tanah bawah terpisah karena potensi oksidasinya berbeda.
- Lumpur (*silt*) yang terangkut dalam air irigasi mengendap dan terkumpul dipermukaan sawah, serta menutup permukaan aslinya.
- Permukaan tanah berubah karena penterasan menjadi petakan-petakan bertangga.



Gambar 12. Ilustrasi pengaruh toposequen dan kedalaman muka air tanah terhadap profil tanah sawah.
Sumber: De Datta (1981)

2. Morfologi tanah sawah

Perubahan morfologi tanah yang pertama diamati oleh Koenigs (1990) pada tanah Latosol yang dipersawahkan di sekitar Bogor; endapan mangan dan besi secara terpisah dijumpai pada kedalaman 28-40 cm. Akibat dari perbedaan potensi reduksi dan oksidasi, atau perbedaan potensi air (*water potential*) perubahan morfologi juga diamati di Eropa Tengah. Pada tanah yang muka air tanahnya (*ground water*) dangkal lapisan besi dan mangan

dapat terjadi ketika ada difusi oksigen, tetapi tidak terjadi pada yang tergenang air (Blume and Schlichting, 1985). Ponnamperuma (1985) mengamati secara komprehensif perubahan yang terjadi pada tanah yang ditanami padi sawah yang digenangi air (*submergence*):

- Eh (*redox potential*) turun, tetapi pH naik
- NH_4^+ - N naik sampai batas waktu tertentu, sebaliknya NO_3^- - N turun
- P terlarut dalam air dan P terlarut dalam asam naik sampai batas waktu tertentu kemudian turun
- Kecenderungan yang sama terjadi pada SO_4^{2-}, F^{2+} terlarut dalam air

Tingkat kenaikan Eh, pH, NH_4^+N, NO_3^- - N, P terlarut, F^{2+} dan SO_4^2 terlarut sangat dipengaruhi oleh tekstur tanah, pH, kandungan Fe dan Mn, bahan organik tanah dan suhu. Perbedaan lingkungan yang mempengaruhi kinetik dari lahan sawah dapat terjadi pada lokasi lahan sawah dalam toposequen (Gambar 12). Pernytaan dari uraian di atas ditunjukkan dalam Kotak 5.

Kotak 5 : Status tanah sawah

Tanah sawah (*paddy soils* atau *lowland rice soils*) walaupun kinetik kimiawinya sama pada semua jenis tanah setelah digenangi air, tetapi karena sifat-sifat tanah aslinya sangat bervariasi, maka tanah sawah tidak dapat dijadikan kelompok (group) tersendiri dalam klasifikasi jenis tanah.

Dudal (1953) dalam De Datta (1981)

3. Klasifikasi jenis tanah sawah

Klasifikasi jenis tanah yang dipetakan pada tahun 1960 (LPT, 1969) masih digunakan oleh Soepraptohardjo dan Suhardjo (1978) dalam klasifikasi jenis tanah sawah (Tabel 13). Tampak adanya kerancuan

kalau klasifikasi jenis tanah lama dibandingkan dengan klasifikasi jenis tanah baru.

Tabel 13. Klasifikasi jenis tanah sawah dengan metode lama disandingkan dengan klasifikasi jenis tanah dengan metode baru*).

Klasifikasi lama	Klasifikasi baru	Keterangan (lokasi dan luas area)
Aluvial	Entisols, Inceptisols	- Iklim basah di Sumatera, Jawa Barat dan iklim agak kering (sub-arid) di Sumbawa, Lombok - Luas 2,9 juta ha
Aluvial gley	Aquepts	- Aluvial, ada fenomena gley pada lapisan bawah; Jawa Barat, Jawa Tengah, Lampung, Sumatera Utara, Sulawesi Selatan - Luas 200.000 ha
Regosol	Entisols	- Iklim basah dan semi basah (sub-humid); Jawa, Bali, Lombok, Sumatera dan Sulawesi - Luas 400.000 ha
Grumosol	Vertisol	- Dataran rendah dan kaki gunung di Jawa Tengah, Jawa Timur dan Sulawesi Selatan - Dataran rendah, dataran aliran sungai dikelilingi oleh perbukitan kapur; Jawa Tengah dan Jawa Timur - Dataran rendah dengan sedikit deposit agak baru berasal dari letusan gunung, kadang-kadang bercampur dengan batuan pasir dari laut - Luas 350.000 ha
Mediteran	Alvisol, Luvisol	- Terjadi di kaki lahan berlereng dan dataran berlereng dari pengunungan tua, dan batuan kapur, biasanya berasosiasi dengan Grumosol atau transisi dari Latosol Kemerahan ke Grumosol - Luas 200.000 ha
Latosol	Inceptisol, Ultisol	- Tersebar di Jawa Timur pada lereng pegunungan tua; pada kaki lereng biasanya didominasi oleh Mediteran - Luas 900.000 ha
Andosol	Inceptisol, Tropohumults	- Luas area terbatas (50.000 ha), padi ditanam pada petakan berteras di lahan berlereng di Jawa Barat, Jawa Tengah, Bali dan Sumatera Utara
Podzolic	Ultisols, Acrisols	- Tersebar dan terpencar di dataran Banten (Jawa Barat), Lampung, Sumatera Timur, Aceh, Sulawesi Selatan - Luas 200.000 ha

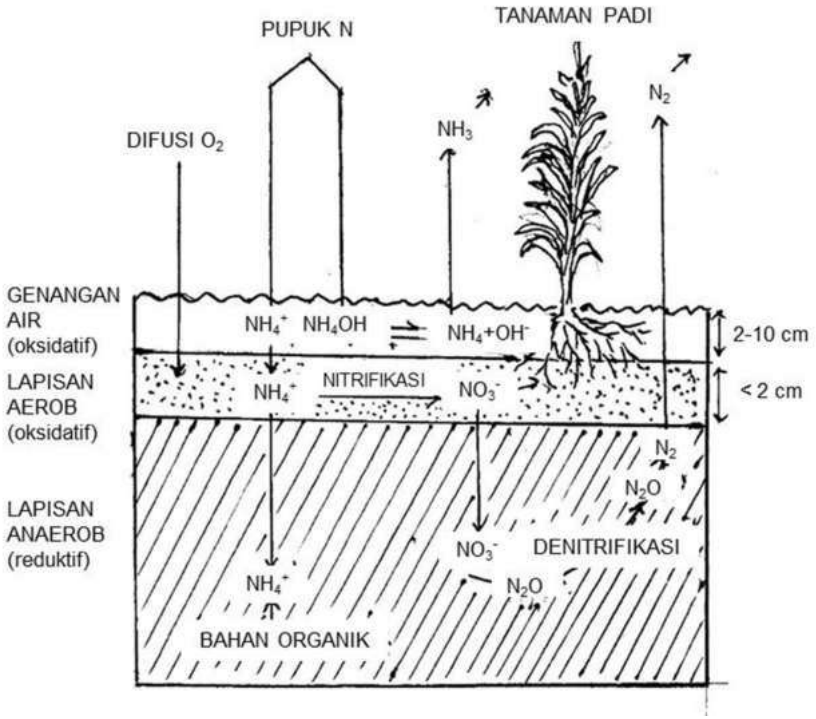
Sumber: Soepraptohardjo dan Suhardjo (1978)

*) Penjelasan tentang karakteristik yang lebih rinci lihat LPT (1964)

4. Regim air petak pertanaman padi sawah irigasi

Moermann dan van de Watering (1985), menyatakan bahwa regim air tanah/kelembaban tanah yang menggunakan istilah *aquatic soil moisture regime* pengertiannya berbeda-beda (*ambiguous*), karena tidak ada batasan antara jenuh dan terus-menerus dalam keadaan reduksi (gley soils); maka, diusulkan agar terminologi *aquatic soil moisture regime* diperjelas dalam *soil survey manual*.

Informasi dalam Tabel 13 dan diuraikan oleh LPT (1969) tidak dapat langsung dijadikan pedoman bagi rekomendasi teknik pemupukan. Pada tanah sawah fenomena volatilisasi amonia dan denitrifikasi nitrat harus menjadi perhatian utama, karena pupuk N (urea) paling banyak digunakan dan disubsidi oleh pemerintah. Penjelasannya dapat dilihat dalam Gambar 13. Permukaan petak sawah tergenang air sedalam 2-7 cm (anjuran 5 cm), di bawahnya ada lapisan tanah yang lembab sedalam <2cm; kedua lapisan ini masih bersifat oksidatif karena oksigen (O_2) masih dapat mengisi pori-pori mikro melalui difusi. Lebih dalam lagi adalah lapisan reduksi karena jenuh air akibat dari pelumpuran. Di lapisan oksidasi ion NH_4^+ (terurai dari pupuk N) tidak stabil, tetapi di lapisan reduksi stabil. Sebaliknya ion NO_3^- tidak stabil di lapisan reduksi. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya fenomena volatilisasi ammonia (NH_3) dan nitrifikasi pada lapisan oksidasi di bawah genangan air (kedalaman <2 cm) dan denitrifikasi pada lapisan reduksi.



Gambar 13. Transformasi pupuk N menjadi gas NH_3 dan NH_4^+ menjadi NO_3^- di lapisan oksidasi (nitrifikasi) dan NO_3^- menjadi N_2O dan N_2 di lapisan reduksi (denitrifikasi).

Sumber: dimodifikasi dari Patrick dan Reddy (1977) dan Savant and De Datta (1980), dalam De Datta (1981).

Alexander (1961) mengevaluasi proses volatilisasi amoniak, nitrifikasi, denitrifikasi sebagai akibat dari kegiatan mikroorganisme tanah dari golongan Bacillus, Micrococcus, Sarcina, Pseudomonas, Achromobacter, Corynebacterium, Clostridium dan Fungi dan Actinomycetes. Di antaranya yang paling dominan adalah urea bacteria (Bacillus pasteurii dan Bacillus freudenreichii; dari tipe cocci adalah Micrococcus ureae

dan Sarcina ureae). Mikroorganisme tersebut membentuk enzim urease untuk menghidrolisa urea dan ammonium karbonate:

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \xrightarrow{\text{urease}} NH_2COONH_4 \rightarrow 2NH_3 + CO_2$$
urea

$$CaCN_2 + 2\ H_2O \rightarrow H_2CN_2 + Ca(OH)_2$$
kalsium cyanamida

$$H_2CN_2 + H_2O \rightarrow CO(NH_2)_2$$
urea

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2\ NH_3\uparrow + CO_2$$

Uraian di atas menunjukkan bahwa pupuk urea dan kalsium cyanamid dapat terdekomposisi menjadi gas ammonia, yang menyebabkan bau pada tumpukan pupuk tersebut.

Volatilisasi ammonium pada genangan air

Volatilisasi ammonia dapat terjadi dalam air genangan pada tanah yang agak masam sampai kemasaman sedang, tetapi paling banyak pada tanah yang beraksi basa. Pada siang hari ganggang hijau aktif berfotosinatesa dan respirasi.

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + H^+$$
atmosfer

Pada tengah hari yang benderang dan suhu air genangan naik, fotosintesis ganggang hijau makin aktif, maka reaksi mengarah ke kiri dan penggunaan ion H^+ bertambah; ini meningkatkan konsentrasi anion OH^- dan pH airpun naik (De Datta, 1981).

$$NH_4^+ + OH^- \rightarrow NH_3\uparrow + H_2O$$
(dari pupuk N)

Volatilisasi NH_3 terjadi kalau pupuk N (urea) disebar langsung ke permukaan tanah. Sebab itu dianjurkan agar pupuk dasar, yaitu pupuk sebelum padi ditanam, dibenamkan ke dalam tanah bersamaan dengan pelumpuran tanah. Pupuk yang ditabur rata ke permukaan tanah saat stadia anakan aktif dan primordia bunga akan divolatilisasi, tetapi NH_3 yang dihasilkan akan dijerap oleh daun-daun tanaman padi.

Menurut De Datta (1981) volatilisasi NH_3 dipengaruhi oleh pH tanah, KTK, tekstur, kation dapat tukar, pengapuran, suhu dan mikroklimat di atas permukaan tanah. Variabel agronomi, yang berpengaruh adalah sumber dan takaran pupuk nitrogen, waktu dan metode pemberian pupuk dan kedalaman pemberian pupuk. Sebagai contoh volatilisasi NH_3 pada KTK 9 meq/100 gran > 26 meq/100 gram > 43 meq/100 gram.

Nitrifikasi

Pada lapisan oksidasi, setebal < 2 cm di bawah genangan air (Gambar 13), nitrifikasi berlangsung. NH_4^+ yang meresap (difusi) ke lapisan ini akan bereaksi dengan oksigen (Alexander, 1961; De Datta, 1981):

$$24\ NH_4^+ + 18\ O_2 \rightarrow 24\ NO_3^- + 24\ H_2O + 48\ H^+$$

$$NH_4^+ + 11/2\ O_2 \rightarrow NO_2^- + 2\ H^+ + H_2O$$

Bakteria nitrifikasi yang menggunakan NH_4^+ dalam metabolismenya adalah *Aspergillus flavus*, *Streptomyces*, *Mycobacterium rubrum*, *Bacillus* spp dan *Vibrio* spp (Alexander, 1961).

Denitrifikasi

Ion nitrat (NO_3^-) meresap ke lapisan reduksi melalui proses difusi. Reduksi NO_3^- berlangsung seperti reaksi berikut.

$$2\ NO_3^- + 10\ H^+ \rightarrow N_2 + 4\ H_2O + OH^-$$

$$2\ NO_2^- + 6\ H^+ \rightarrow N_2 + 2\ H_2O + 2\ OH^-$$

$$N_2O + 2\ H^+ \rightarrow N_2 + H_2O$$

Mikroba tanah yang memfasilitasi reduksi nitrat adalah *Thiobacillus denitrificans*. Reduksi nitrat ini menghasilkan energi untuk pertumbuhan *T. denitrificans* (Alexander, 1961).

Semula nitrifikasi-denitrifikasi dianggap sebagai penyebab kehilangan nitrogen dari lahan sawah yang dilumpurkan. Kehilangan nitrogen pada 10 hari setelah pupuk N (urea) ditaburkan ke permukaan tanah pertanaman padi di KP Sukamandi, BB Padi, Subang, Jawa Barat adalah 31%, sedangkan kehilangan nitrogen kalau pupuk urea dibenamkan hanya 10%; sebagian terbesar kehilangan itu disebabkan oleh volatilisasi ammonia (NH_3); nitrifikasi-denitrifikasi sangat sedikit (<0,1%) Buresh *et al*., 1991).

5. Bahan organik pada sawah jenuh air

Pada lahan sawah struktur tanah dirusak oleh proses pelumpuran tanah dan sifat fisiko-kimia tanah berubah setelah pelumpuran diikuti oleh penggenangan permukaan petakan sawah (Gambar 13). Menurut Buresh dan Dobermann (2010) dan Mamaril *et al*. (2009) dalam Buresh dan Dobermann (2010), konsekuensi dari keadaan demikian adalah: (1) dekomposisi bahan organik berlangsung tanpa udara (anaerob), maka yang dihasilkan adalah gas metan (CH_4), H_2S dan beberapa asam organik yang beracun bagi tanaman kalau konsentrasinya berlebihan, (2) reaksi tanah mendekati pH 7,0 dari reaksi tanah awal yang masam atau basa, menyebabkan unsur hara makro dan mikro lebih tersedia bagi tanaman padi, kecuali nitrogen (N), dan (3) kebutuhan unsur hara N dari tanaman padi varietas unggul tidak dapat dipenuhi oleh bahan organik/pupuk organik, padahal varietas padi unggul sangat tanggap terhadap pupuk N.

Buresh dan Dobermann (2010) juga menegaskan bahwa pemberian bahan organik pada tanah sawah jenuh air terhadap sifat fisik tanah, aktivitas biologi tanah dan sifat kimia tanah sangat rendah, bahkan *negligible* berturut-turut akibat struktur tanah yang rusak oleh proses pelumpuran, penggenangan mematikan mikroorganisme aerob dan memunculkan mikroorganisme anaerob; penggenangan menyebabkan pH tanah mendekati netral. Namun adakalanya pemberian bahan organik meningkatkan sumber hara tanah kalau bahan organik itu kaya kandungan unsur hara dan jenisnya mudah atau cepat terdekomposisi.

Tanah Sawah pada Rawa Pasang-Surut

Aspek fisik dan kimia dari tanah sawah pada rawa pasang-surut telah banyak diuraikan oleh peneliti dari Balai Penelitian Tanaman pada Rawa Pasang-Surut (Balittra), SWAMP I dan II, ISDP (*Integrated Swamps Development Project*). Tim yang ditugasi oleh Direktorat Jenderal Prasarana dan Sarana Pertanian, Kementerian Pertanian untuk merumuskan ulang Program Nasional Pengembangan Sistem Usaha Pertanian berbaisis Tanaman Pangan di Lahan Ex-PLG (A.M. Fagi, Subagio dan Adimesra Djulin) mereview dan meringkas tulisan-tulisan dan laporan-laporan tersebut.

1. Tipe luapan

Tipe luapan akibat dari pasang-surut air laut yang berimbas pada naik-turunnya air sungai yang melintasi kawasan dibedakan ke dalam 4 tipe luapan, yaitu: A, B, C dan D.

Tipe A

- Terletak di bagian kawasan yang paling rendah dan dipengaruhi langsung oleh pasang-surut harian.

- Selalu terluapi air pasang besar dan pasang kecil harian sepanjang tahun pada MH dan MK, maka selalu jenuh air.

Tipe B

- Terletak di bagian kawasan yang lebih tinggi, ke arah tanggul sungai atau ke arah kubah gambut.
- Hanya terluapi air pasang besar, tidak oleh pasang kecil, maka air hanya menggenang selama pasang besar; air tanah berada di bawah permukaan tanah, selama pasang kecil.

Tipe C

- Terletak di bagian kawasan yang relatif kering.
- Tidak terluapi baik oleh air pasang kecil dan terluapi oleh pasang besar; pengaruhnya terhadap air tanah kedalaman air tanah <0,5 m.
- Kawasan ini dapat terluapi oleh air hujan pada MH.

Tipe D

- Kawasan yang selalu kering, tidak terluapi oleh pasang besar.
- Kedalaman air tanah > 0,5 m.
- Dapat digolongkan sebagai lahan tadah hujan basah (kalau ada limpasan air yang ditampung dalam petakan yang dikelilingi galengan) atau lahan kering (gogo) kalau tidak ada galengan penahan air.

2. Tipologi lahan

Tabel 14 memuat tipologi lahan pada berbagai klsifikasi, lapisan pirit adalah penciri utama diikuti/dimodifikasi oleh salinitas.

Tabel 14. Tipologi lahan pada berbagai klasifikasi dari tanah sawah rawa pasang-surut.

Klasifikasi tipologi lahan, 1989-1990*	Klasifikasi tipologi lahan, 1997-1998*	Klasifikasi Widjaja-Adhi 1997	Kedalaman pirit bahan sulfidik	Taksonomi Tanah, 1999
Lahan potensial	Lahan potensial-1 (Pot-1)	Aluvial bersulfida sangat dalam (SMP-3)	101-150 cm (bahan sulfidik)	ENTISOLS - Typic/Aeric/Sodic hydraquents; purwaquents; endoaquents
	Lahan potensial-2 (Pot-2)	Aluvial bersulfida dalam (SMP-2)	51-100 cm (bahan sulfidik)	ENTISOLS - Sulfic hydraquents/ Fluvaquents; Endoaquents
	Sulfat masam potensial (SMP)	Aluvial bersulfida dangkal (SMP-1)	0-50 cm (bahan sulfidik)	ENTISOLS - Typic/Haplic/Thapto - Histic sulfaquents;
	Sulfat masam potensial bergambut (gambut < 50 cm), (SMPG)	Aluvial bersulfida dangkal bergambut (histik sulfat masam)	0-50 cm (bahan sulfidik)	ENTISOLS - Histic Sulfaquents;
Lahan sulfat masam	Sulfat masam aktual-1 (SMA-1)	Aluvial bersulfat-1 (SMA-1)	0-100 cm (bahan sulfidik teroksidasi)	ENTISOLS - Sulfic hydraquents/ Fluvaquents; Endoaquents INCEPTISOLS - Sulfic endoaquents
	Sulfat masam aktual-2 (SMA-2)	Aluvial bersulfat-2 (SMA-2)	0-50 cm (horizon sulfurik)	INCEPTISOLS - Typic sulfaquents - Hydraquentic sulfaquents - Salidic sulfaquents
Lahan salin	Lahan salin (LS)	Salinitas dapat terjadi pada berbagai tipelogi	0-150 cm (bahan sulfidik)	ENTISOLS - Sodic hydraquents/ Endoaquents;

Tabel 14. Lanjutan.

Klasifikasi tipologi lahan, 1989-1990*	Klasifikasi tipologi lahan, 1997-1998*	Klasifikasi Widjaja-Adhi 1997	Kedalaman pirit bahan sulfidik	Taksonomi Tanah, 1999
	Gambut dangkal (50-100 cm gambut (GDK)	Gambut dangkal (50-150 cm gambut (G-1)	0-50 cm (horizon sulfurik)	HISTOSOLS - Typic sulfohemists/ sulfisaprists
			0-100 cm (bahan sulfidik)	HISTOSOLS - Typic/Terric sulfihemists/ sulfisaprists
			>100 cm (bahan sulfidik)	HISTOSOLS - Haplofibrists/ hemists/saprists saprists
Lahan gambut	Gambut dangkal (50-100 cm gambut (GSK)	Gambut dangkal (50-100 cm gambut) (G-1)	0-50 cm (horizon sulfurik)	HISTOSOLS - Typic sulfohemists/ sulfisaprists
			0-100 cm (bahan sulfidik)	HISTOSOLS - Typic/Terric sulfihemists
			>100 cm (bahan sulfidik)	HISTOSOLS - Haplofibrists/ sulfosaprists
	Gambut dangkal (50-100 cm gambut (GSD)	Gambut tengahan (101-200 cm gambut) (G-2)	0-50 cm (horizon sulfurik)	HISTOSOLS - Typic sulfohemists/ sulfosaprists
			0-100 cm (bahan sulfidik)	HISTOSOLS - Typic/Terric sulfohemists/ sulfosaprists

Tabel 14. Lanjutan.

Klasifikasi tipologi lahan, 1989-1990*	Klasifikasi tipologi lahan, 1997-1998*	Klasifikasi Widjaja-Adhi 1997	Kedalaman pirit bahan sulfidik	Taksonomi Tanah, 1999
			>100 cm (bahan sulfidik)	HISTOSOLS - Haplofibrists/ hemist/saprists
	Gambut dalam (201-300 cm gambut (GDL)	Gambut dalam (201-300 cm gambut) (G-3)	>100 cm (bahan sulfidik)	HISTOSOLS - Typic sulfohemists/ saprists - Typic/Terric sulfohemists/saprists
	Gambut sangat dalam (>300 cm gambut (GSDL)	Gambut sangat dalam (>300 cm gambut) (G-4)	>100 cm (bahan sulfidik)	- Haplofibrists/ hemists/saprists

Keterangan Tabel 14:

Definisi bahan sulfidik dan horizon sulfurik:

- Bahan sulfidik: tanah mineral atau bahan organik yang mengandung pirit asli dalam keadaan jenuh air atau tergenang dan belum teroksidasi.

  Kriteria
  - pH >3,5
  - apabila lapisan setebal 1 cm diinkubasi dalam 8 minggu, pH turun >0,5 unit menjadi >4,0.
- Horizon sulfurik: bahan tanah mineral atau bahan organik berupa lapisan atau horizon dari profil mengandung pirit yang telah teroksidasi.

  Kriteria
  - tebal ≥15 cm
  - pH >3,5

- pH rendah disebabkan oleh asam sulfat, ditandai oleh ada karatan jerosit, kandungan sulfat-larut air ≥0,05 persen.
- terletak di atas lapisan yang mengandung bahan sulfidik.

Dari klasifikasi tipologi lahan rawa pasang-surut, lahan sulfat masam dan lahan gambut rentan terhadap sustainabilitas daya dukung terhadap budidaya pertanian.

- Lapisan pirit tidak boleh muncul ke permukaan tanah, sekali muncul ke permukaan tanah unsur besi akan teroksidasi, pH akan sangat rendah dan sebab itu tak ada tanaman yang bisa tumbuh.
- Bahan organik pada tanah bergambut/gambut tidak boleh kering; sifat memegang air (*water retention*) bersifat *irreversible*, artinya sekali kering akan tetap kering walaupun tergenang air, maka sangat rentan terhadap kebakaran.

3. Pembentukan dan oksidasi pirit

Proses pembentukan pirit berlangsung secara bertahap:

- Reduksi sulfat (SO_4^{2-}) menjadi sulfida (S) oleh bakteri pereduksi sulfat pada kondisi aerobik
- Oksidasi parsial sulfida menjadi polisulfida atau unsur S, diikuti pembentukan FeS_2 dan besi oksida (Fe_2O_3)
- Pembentukan FeS_2 dari hasil reaksi Fe_2O_3 dengan SO_4 atau pengendapan langsung hasil reaksi antara Fe^{2+} yang larut dalam air dengan ion-ion polisulfida.

Reaksi pembentukan pirit dari besi oksida (Fe_2O_3)

$$Fe_2O_3 + 4\ SO_4^{2-} + 8\ CHO^- + \tfrac{1}{2}\ O_2 \rightarrow 2\ FeS_2 + 8\ HCO_3^- + 4\ H_2O$$

Bahan organik pirit karbonat

Kalau rawa pasang-surut direklamasi, pembuatan saluran drainase akan menurunkan muka air tanah, dan lapisan pirit menjadi oksidatif (O_2 masuk) atau aerobik. Maka, pirit akan bereaksi dengan O_2.

$$FeS_2 + 15/4\ O_2 + 7/2\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2\ SO_4^{2-} + 4\ H^+$$

$$Fe^{3+} \text{ dan } 3\ OH^-$$

Terbentuknya ion SO_4^{2-} dan melimpahnya H^+, akan menurunkan pH pada kisaran 1,9-<3,5. Ion H^+ yang berlebihan akan merusak mineral liat dan membebaskan ion Al^{3+} yang toksik (beracun) bagi tanaman.

Lama kelamaan kalau kondisi aerobik berlanjut, FeS_2 akan teroksidasi dan menghasilkan jerosit (berbentuk karatan berwarna kuning jerami).

$$FeS_2 + 15/4\ O2 + 5/2H_2O + 1/3\ K^+ \rightarrow 1/3\ KFe_3(SO_4)^2(OH)_6 + 4/3\ SO_4^{2-} + 4\ H^+$$

(jerosit)

Pada MH, air tanah naik ke permukaan tanah, SO_4^{2-} tereduksi menjadi H_2S dan Fe $(OH)_3$ menjadi Fe^+ dan OH^- yang larut dalam air.

Tanah Sawah pada Rawa Lebak

1. Tipologi

Dari luas 13,27 juta ha rawa lebak, 1,425 juta ha telah direklamasi, 342 ribu ha di antaranya telah dikembangkan, tetapi hanya 222 ribu ha yang telah dimanfaatkan. Rawa lebak dibedakan ke dalam 3 tipologi berdasarkan kedalaman dan lamanya genangan air (Noor, 2007):

- Lebak dangkal
  - tinggi genangan 25-50 cm, lama genangan 3 bulan dalam setahun
  - letaknya berdekatan dengan tanggul sungai disebut lebak pematang
- Lebak tengahan
  - tinggi genangan 50-100 cm, lama genangan 3-6 bulan
  - letaknya antara lebak dangkal dan lebak dalam

- Lebak dalam
  - tinggi genangan >100 cm, lama genangan >6 bulan
  - terletak di dataran yang paling rendah

Rawa lebak dapat ditanami pada MK, ketika air genangan telah surut. Tanah rawa lebak terdiri atas tanah mineral (Aluvial) dan tanah bergambut yang ciri-ciri fisik dan kimia tanah seperti dalam Tabel 15. Tanah rawa lebak pada MK tidak berbeda dengan padi sawah tadah hujan. Klasifikasi tanahnyapun dijelaskan seperti yang dipresentasikan oleh Soepraphardjo dan Sukardjo (1978).

Untuk mengatasi masalah yang berkenaan dengan tipe genangan dan sifat fisik dan kimia tanah, harus dirancang teknik budidaya secara cermat.

Tabel 15. Ciri-ciri dari tanah mineral dan tanah bergambut pada lahan rawa lebak.

Ciri-ciri fisika dan kimia tanah	Tanah mineral (Aluvial)	Tanah bergambut
Berat jenis (kerapatan lindak)	tinggi (1-2 g/cm^3)	rendah (0,05-0,5) g/cm^3
Kematangan tanah	hampir matang-matang	mentah-hampir matang
Porositas	rendah	tinggi
Daya pegang air	rendah	tinggi
Kandungan bahan organik	rendah (<12%)	tinggi (12-20%)
Kemasaman (pH)	5-6	<4
Ketersediaan hara	sedang-tinggi	rendah
Kapasitas tukar kation (KTF)	rendah	tinggi

Sumber: Noor (2007)

2. Teknik budidaya

Pengaturan tata air

Teknik budidaya padi, berupa komponen teknologi PTT (Pengelolaan Tanaman dan Sumberdaya Terpadu), sama dengan yang dianjurkan pada padi sawah. Hal ini akan berhasil kalau didahului dengan penataan dan pengaturan air:

(1) Zonasi tipologi lahan berupa pemetaan lebak dangkal, tengah, dan dalam,

(2) Konstruksi tanggul-tanggul untuk memfasilitasi aktivitas usahatani (transportasi sarana produksi dan produksi), termasuk pemeliharaan,

(3) Konstruksi saluran drainase primer, sekunder dan tersier yang dilengkapi dengan pintu pengendali (*outflow control*),

(4) Kontruksi dam – parit yang berfungsi sebagai *collector drainage*.

Varietas padi

Varietas padi unggul baru cocok ditanam pada lebak dangkal, tengahan dan dalam; waktu tanam disesuaikan surutnya genangan air (Tabel 16).

Tabel 16. Hasil gabah 3 varietas padi unggul pada lebak dangkal, tengahan dan dalam.

Tipologi lahan	Varietas padi	Hasil (ton GKG/ha)	Rata-rata (ton GKG/ha)
Lebak dangkal	Batanghari	3,4	
	IR42	3,5	3,6
	Sungai Lalan	3,9	
Lebak tengahan	Batanghari	3,4	
	IR42	3,5	3,7
	Sungai Lalan	4,1	
Lebak dalam	Batanghari	4,2	
	IR42	4,3	4,5
	Sungai Lalan	4,9	

Desa Batu Ampar, Sumatera Selatan, MT 2003/2004
Sumber: Noor (2007)

Sistem tanam, ameliorasi dan pemupukan

Tanah bergambut bereaksi masam (pH <4), maka perlu pengapuran. Tanah bergambut terdapat di semua tipologi lahan, sebab itu delineasi dan pemetaan diperlukan. Anjuran ameliorasi

dan pemupukan pada beberapa sistem budidaya ditunjukkan dalam Tabel 17.

Tabel 17. Anjuran ameliorasi dan pemupukan pada berbagai sistem budidaya di rawa lebak.

Sistem budidaya	Jenis tanah	Amelioran dan pupuk					
		Kapur	N	P_2O_5	K_2O	$CuSO_4$	$ZnSO_4$
Tanam pindah	Mineral	-	45-90	90	60	-	-
	Bergambut	500-2000	45-125	45-60	25-50	2-5	2-5
Gogo rancah	Mineral	-	45-90	45-90	25-50	-	-
	Bergambut	1000	45	60	50	5	5
Rancah gogo	Mineral	-	90-125	50-70	50	-	-
Gogo	Mineral	-	45-90	90	50	-	-
	Bergambut	1000	45	60	50	5	55

Sumber: Noor (2007)

Brady (1974) menunjukkan bahwa Cu dan Zn cukup tersedia pada pH <5,0. Tetapi Noor (2007) justru menganjurkan pemupukan $CuSO_4$ dan $ZnSO_4$ pada tanah bergambut dengan pH <4,0 (Tabel 18). Kontoversi pendapat dan anjuran itu dijelaskan sebagai berikut:

- Brady (1974) menggunakan data dari tanah mineral, sedangkan Noor (2007) menganjurkan pemupukan yang mengandung Cu dan Zn pada tanah bergambut.
- Tanah bergambut sangat miskin unsur hara dalam bentuk unsur hara mikro. Jadi, pemupukan $CuSO_4$ bertujuan untuk menyediakan unsur hara Cu dan Zn. Peran Cu dan Zn dalam tanaman dijelaskan dalam Bab VI.

Kalau pemerintah akan memperluas program intensifikasi produksi padi pada lahan pasang-surut dan rawa lebak yang di antaranya lahan bergambut, maka fabrikasi pupuk mikro, seperti $CuSO_4$ dan $ZnSO_4$ adalah sangat prospektif. Compotex dan IPNI (2009) hanya mentabulasi Copper sulfat-mono hydrate

($CuSO_4.H_2O$), Copper sulfat-pentahydrate ($CuSO_4.5H_2O$) dan Copperchelate (Cu-EDTA).

Tabel 18. Contoh data analisis tanah dan penggunaannya dalam praktek pertanian.

Data analisis tanah	Unit		Nilai	Rekomendasi
	baru	lama		
Pasir	%	%	>50	Kehilangan unsur hara karena pencucian akan banyak; kembalikan sisa-sisa tanam untuk memperkaya bahan organik, memperkaya retensi unsur hara, dan kelembaban tanah
Liat	%	%	>45	Drainase terhambat, KTK tinggi jika mineral liatnya 2:1 kemampuan meningkatkan bahan organik tanah
Liat	%	%	<30	Kandungan hara tanah rendah; daya pegang air rendah; kurang dapat meningkatkan bahan organik
pH (dalam air)	-	-	<4,5	Perlu pengapuran sampai maksimum pH = 5,5
pH (dalam KCl)	-	-	<4,2	Perlu pengapuran sampai maksimum pH = 5,5
C-organik	%	%	<1,5	Kurang mampu mengikat unsur hara; N tanah rendah; sifat fisik jelek (pengolahan tanah dan air tanah berpengaruh)
N-total	%	%	<0,15	Kandungan N tanah sangat rendah
P total (HCl 25%)	mg/kg	ppm	<200	Kahat P; pemupukan P dan pupuk kandang
P (Bray I)	mg/kg	ppm	<15	Kahat P; pemupukan P dan pupuk kandang
KTK	cmol/kg	meq/kg	<10	Daya pegang kation rendah; perlu pemupukan organik
K dapat tukar	cmol/kg	meq/kg	<0,15	Kahat K; pemupukan K dan pupuk kandang
Mg dapat tukar	cmol/kg	meq/kg	<0,2	Kahat Mg; pemupukan Mg (dolomit dan pupuk kandang)
Ca dapat tukar	cmol/kg	meq/kg	<0,5	Kahat Ca; pemupukan kapur dan pupuk kandang

Sumber: Canpotex, PPI/PPT (2004)

Tanah pada Lahan Tadah Hujan

Pada awalnya semua lahan pertanian merupakan lahan tadah hujan. Sumber air untuk tanamannya semata-mata adalah air hujan. Petani mengamati kenyataan di lapang bahwa tidak semua air hujan meresap ke dalam tanah pertanian, sedangkan kelebihannya mengalir ke lokasi yang lebih rendah menuju laut. Maka, mereka menahan air hujan sebanyak-banyaknya di lahan pertaniannya dengan menteras-teras dan mengelilingi petakan-petakan berteras itu dengan galengan.

Air hujan limpahan (*runoff water*) dialirkan ke hamparan lahan pertanian di dataran yang lebih rendah melaui saluran-saluran air, yang debit airnya tidak diukur; terciptalah irigasi pedesaan non-teknis yang sederhana atau irigasi sederhana.

Pada topografi lahan yang berombak atau bergelombang dan terputus-putus dengan hamparan yang tidak luas lahan pertanian diteras, tetapi tidak dilengkapi saluran air; ada pula yang tidak diteras. *Catchment* areanya tidak luas sehingga limpasan air hujan tidak cukup besar debitnya untuk dialirkan melalui saluran.

Jadi, pada lahan tadah hujan dijumpai dua sistem pertanian: (1) lahan tadah hujan basah, dan (2) lahan tadah hujan kering.

Petani dimanapun wilayahnya akan menanami lahan pertanian dengan padi; palawija ditanam dalam pola tanam berbasis tanaman padi.

IRRI (1998) mendefinisikan lahan tadah hujan basah (*rainfed lowland ecosystem*) dan lahan tadah hujan kering (*rainfed upland ecosystem*) dalam konteks sistem budidaya padi sawah tadah hujan dan padi lahan kering atau padi gogo.

Karena beras merupakan makanan pokok penduduk Indonesia, maka petani umumnya akan selalu menanam padi kalau air hujan diperkirakan cukup buat tanaman padinya. Berdasarkan evaluasi, besarnya evapotranspirasi dari tanaman

padi sekitar 7 mm/hari. Maka curah hujan sebanyak ≥200 mm/bulan dianggap sebagai curah hujan minimum untuk tanaman padi. Kalau masa dari persiapan tanam – tanam – panen 4,5 bulan atau 135 hari, total kebutuhan air (dihitung dari besarnya evapotraspirasi) adalah 945 mm. Sementara curah hujan tahunan untuk wilayah beriklim kering 1000-2000 mm (Balitklimat, 2003) atau rata-rata 1500 mm. Jadi, wajar kalau petani selalu menanam padi pada iklim tropik basah seperti di Indonesia.

1. Lahan tadah hujan basah

Definisi IRRI (1989)

- Lahan sawah tadah hujan adalah hamparan petakan sawah yang dikelilingi oleh galengan agar dapat menampung air dengan kedalaman tidak lebih dari 50 cm selama lebih dari 10 hari berturut-turut dan petakan digenangi setidak-tidaknya sebagian dari musim tanam (MH)
- Hamparan petakan sawah tidak mendapat akses ke sistem irigasi, tetapi mempunyai fasilitas penampungan atau konservasi.

Lingkungan tumbuh

- Jenis tanah sangat beragam, dari definisi disimpulkan bahwa tanah bertekstur sedang sampai berat dengan drainase internal sedang
- Curah hujan berfluktuasi, terpengaruh oleh anomali iklim El Nino atau La Nina yang sulit diprakirakan
- Lokasi atau hamparan sawah tidak kompak, terpencar menjadi unit-unit produksi yang umumnya sempit.

Teknik budidaya

- Akibat dari curah hujan yang fluktuatif, maka stabilitas hasil komoditas pertanian dan equitabilitasnya tergolong rendah (Gambar 1).

- Untuk membuat hasil usahatani lebih pasti, adopsi sistem gogorancah pada padi diikuti oleh walik jerami (Balingtan, 2015a)
- Sistem integrasi tanaman (padi dan palawija) ternak untuk memanfaatkan residu tanaman, meningkatkan KTK dan daya pegang air oleh tanah, serta memfasilitasi pengolahan tanah karena tanah mempunyai konsistensi remah/lunak (Baver, 1966)
- Embung individual atau kolektif dianjurkan untuk menampung air hujan, dan menggunakan air secara hemat dengan sistem irigasi bergilir (Balingtan, 2015b).

2. Lahan tadah hujan kering

Definisi IRRI (1989)

- Lahan tadah hujan kering (kalau ditanami padi disebut lahan padi gogo) adalah lahan pertanian baik yang dikelilingi galengan atau tidak yang drainase alaminya baik sehingga tidak ada genangan air sepanjang musim tanam.

Lingkungan tumbuh

- Tanah cenderung masam, tidak subur dan terancam oleh erosi berat/parah
- Drainase internalnya yang baik (tidak ada genangan) mengindikasikan bahwa tanah bertekstur ringan.

Teknik budidaya

- Pada daerah perbukitan dengan topografi berombak/ bergelombang teknik konservasi tanah dan air sangat dianjurkan.
- Sistem usahatani dengan menerapkan tanaman lorong dianjurkan (Tabel 9); diversifikasi usahatani berbasis tanaman pangan diutamakan, sedangkan tanaman sepanjang bibir teras berupa pohon multiguna.

- Pergiliran varietas padi dan palawija bertujuan untuk menghindari perubahan patotipe penyakit blas pada tanaman padi.
- Populasi gulma ditekan dengan menerapkan pola tanam ~ tanam bersusulan (*relay cropping*) atau tanam berurutan (*rotational planting*).

Tanah pada lahan tadah hujan basah harus diperlukan berbeda untuk meningkatkan produktivitasnya. Sistem gogorancah menghadapi kondisi reduksi-oksidasi (redox) yang unik:

- pada saat terjadi La Nina, air berlebihan; tanah sawah akan selalu tergenang, maka genangan air di permukaan petakan identik dengan kondisi tanah pada sawah irigasi,
- saat terjadi El Nino, regim air di petakan sawah lembab atau kering; kondisi ini identik dengan tanah pada pertanaman padi gogo.

Karena kejadian La Nina atau El Nino belum dapat diprakirakan secara tepat, teknologi pola tanam dan komponennya harus bersifat adaptif terhadap kondisi reduktif atau oksidatif.

Contoh Interpretasi Data Karakteristik Tanah dan Kegunaannya

Dalam Tabel 18 ditunjukkan karakteristik tanah dan interpretasinya untuk praktek pertanian:

(1) Proporsi kandungan pasir dan liat adalah parameter penting dalam mempertahankan tingkat kesuburan tanah

(2) KTK disusun/dinilai dari proporsi kandungan pasir, debu dan liat (diantaranya partikel liat yang paling menentukan),

(3) pH adalah indikator kesuburan tanah dan pegangan dalam upaya meningkatkan produktivitas lahan

(4) Di antara unsur hara, N memegang peranan karena lebih banyak diperlukan tanaman dan mineral tanah tidak mengandung unsur N

(5) Analisis kandungan P, K, Mg dan Ca berguna untuk menentukan jenis pupuk dan takarannya; pemupukan Ca, Mg terkait dengan pengapuran.

Sintesis

Uraian tentang parameter dari karakteristik tanah difokuskan kepada penciri dari tingkat kesesuaian lahan untuk tanaman pangan, tanaman hortikultura, tanaman industri/perkebunan dan tanaman pastura. Dalam Tabel 4 dan 5, contoh kesesuaian lahan untuk tanaman padi dan kedelai, struktur tanah sebagai salah satu parameter bagi budidaya tanaman, tidak tercantum.

Ketika buku tentang ilmu tanah yang ditulis oleh para perintis ilmu tanah moderen, perubahan iklim belum menjadi perhatian dunia, di antaranya perhatian terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) gas metana (CH_4). Perhatian terfokus kepada volatisasi NH_3, nutrifikasi dan denitrifikasi N_2O dan N_2, karena ketiganya adalah penyebab dari rendahnya efisiensi pupuk N.

1. Struktur tanah

Mengapa struktur tanah tidak termasuk penciri dari tingkat kesesuaian lahan untuk pertanian? Brady (1974) membedakan struktur mineral tanah berdasarkan bentuknya (Gambar 14).

Gambar 14. Ilustrasi berbagai bentuk dari struktur tanah
Sumber: Brady (1974)

Penjelasan Gambar 14:

- Seperti lempengan (*plate like*): dapat dijumpai di semua profil sejak awal pembentukan tanah dari bahan induk.
- Seperti prisma (*prism like*): prismatik pada ujungnya atau kolumar bulat pada ujungnya; terutama pada lapisan bawah (*sub soil*) pada daerah beriklim kering (*arid*) dan *semi-arid.*
- Tidak beratuan (spheroidal ~ granuler atau remah; karakteristik pada irisan bajak (furrow slice): mudah berubah.
- Tidak beratuan (spheroidal ~ granuler atau remah; juga karakteristik pada irisan cekungan.

Beberapa penyebab dari tidak diperhitungkannya stuktur tanah sebagai penciri kesesuaian lahan untuk pertanian:

- Pengolahan tanah berkali-kali dengan berbagai pola tanam merusak semua bentuk struktur tanah.
- Mikroorganisme merombak/menghancurkan bahan organik (fragmen akar, ranting dan dedaunan, dan jasad binatang kecil); hasil penghancuran itu menjadi pelekat yang mengubah bentuk struktur tanah
- Pelumpuran tanah sawah merusak sepenuhnya struktur tanah.

2. Emisi gas rumah kaca

Profil lahan sawah seperti ditunjukkan dalam Gambar 13, selain memfasilitasi proses volatilisasi NH_3, nitrifikasi diikuti denitrifikasi N_2O dan N_2, juga memfasilitasi emisi gas CH_4. Pembentukan CH_4 dikendalikan oleh reaksi reduksi oksidasi dalam genangan air. Di antara sederet reaksi itu difasilitasi oleh aktivitas bakteri metanogenik dalam dekomposisi bahan organik tanah pada potensi reduksi-oksidasi (*redox potential*) -150 mV. Reaksi kimia pembentukan CH_4 (Ponnamperuma, 1992, dalam Setyanto, 2004), adalah:

$$(CH_2O)_n \xrightarrow[\text{bakteri}]{\text{metanogenik}} \frac{n}{2} CO_2 + \frac{n}{2} CH_4$$

Gas CH_4 dapat bertahan di lapisan troposfir sekitar 7-10 tahun. Lahan sawah diperkirakan menyumbang 15-45% CH_4 di troposfir, sedangkan lahan kering menyumbang 3-10% (Siegers dan Kenger, 1997, dalam Wihardjaka dan Setyanto, 2007). Teknik irigasi bergilir paling besar (sekitar 50%) dalam menekan emisi CH_4. Sementara, infrastruktur irigasi belum siap menerapkan irigasi bergilir, komponen teknologi budidaya yang dianjurkan, adalah:

(1) Memelihara ikan pada padi sawah (mina-padi); ikan mengaduk-aduk zona perakaran padi yang memfasilitasi difusi oksigen.

(2) Pemberian pupuk kandang matang dan hindari pembenaman jerami saat pengolahan tanah, maka terapkan sistem integrasi; tanaman padi – ternak sapi; gas CH_4 yang dihasilkan dalam pematangan kotoran sapi berfungsi sebagai biogas untuk rumah tangga.

(3) Tanam varietas yang menghasilkan eksudat pada akar dan meningkatkan konsentrasi oksigen pada zona perakaran.

3. Kualitas lumpur

Telah diuraikan bahwa genangan air pada sistem persawahan menurunkan pH pada tanah alkalis dan meningkatkan pH pada tanah masam, sehingga unsur hara lebih tersedia bagi tanaman padi. Sebab itu sistem persawahan dapat bertahan selama ratusan tahun. Genangan air pada permukaan petak sawah menjadi pokok bahasan ilmiah.

Hasil penelitian aspek fisika tanah sawah membuktikan bahwa kualitas lumpur memodifikasi pengaruh dari genangan (*submergence*). Kualitas lumpur dinilai dengan menggunakan ASV (*Apparent Specific Volume*). Fagi dan De Datta (1983) dan De Datta (1981) merumuskan ASV:

$$ASV = m + \frac{1}{P_p}$$

dimana, m = berat air tanah per unit berat tanah yang dikeringkan dalam oven, P_p = densitas partikel tanah

Perubahan ASV dihitung dengan rumus:

$$\Delta ASV = ASV_2 - ASV_1$$

dimana, ΔASV = perubahan *Apparent Specific Volume*, ASV2 = ASV yang dukur beberapa hari setelah tanam, dan ASV1 = ASV yang diukur sebelum tanam. Berdasarkan ΔASV, kualitas pelumpuran dibedakan:

- granuler, ΔASV = 0,03 – 0,05 cm^3/gram
- pasta, ΔASV = 0,06 – 0,09 cm^3/gram
- berlumpur (muddy), ΔASV = >0,10 cm^3/gram

Kualitas lumpur yang terbaik adalah *muddy*. Hal ini dipengaruhi oleh pola tanam dan jenis tanaman yang ditanam pada pola tanam berbasis padi, juga oleh pembenaman residu tanaman (Fagi dan De Datta, 1983).

Tanah yang melumpur sempurna (*muddy*) lebih subur (kandungan hara yang terbebas lebih banyak), mengingat lebih banyak air tanah (mengurangi cekaman kekurangan air), menurunkan potensi rodex lebih besar (lebih reduktif). Tetapi, lebih berat kalau tanah diolah untuk tanaman palawija setelah padi dipanen. Karena pelumpuran yang lebih sempurna lenih menurunkan potensi redox atau lebih reduktif, diduga emisi CH4 akan lebih besar. Hal ini perlu diteliti lebih lanjut.

Diversifikasi usahatani berbasis padi termasuk program yang dirancang (intensifikasi, ekstensifikasi, rehabilitasi, dan diversifikasi). Sebagai contoh rehabilitasi infrastruktur irigasi bertujuan untuk selain menunjang program intensifikasi dan ekstensifikasi juga menunjang diversifikasi. Diversifikasi dalam

satu unit lahan pertanian adalah pola tanam. Kalau tanaman palawija setelah padi dipanen dianggap sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi penggunaan lahan dan pendapatan petani (Gambar 5), maka tanaman palawija harus diperlakukan sama dengan tanaman padi.

Soil tilth adalah konsep yang dibahas Baver (1966) patut dipertimbangkan. Konsep ini berkaitan dengan lingkungan fisik tanah, terutama yang menyangkut konsistensi tanah. Tanaman palawija perlu kondisi fisik tanah yang tepat difasilitasi dengan pengolahan tanah untuk menunjang pertumbuhan awal dari tanaman. Kalau total produksi tanaman padi dan palawija yang diinginkan, maka kualitas lumpur berbentuk granuler (ΔASV = 0,03-0,05 cm^3/gram) adalah yang lebih ideal. Kondisi ini adalah *trade-off* antara tanaman padi dan tanaman palawija.

4. *Agroecosystem properties* dari lima lahan pertanaman padi

Status kemajuan teknologi dan penerapannya pada budidaya padi dilustrasikan dengan menggunakan analisis dari Alfes (1987 dalam Fagi, 2015). Pada lahan sawah irigasi budidaya padi intensif telah mencakup hampir semua lahan sawah irigasi. Intensifikasi budidaya padi sawah tadah hujan dengan teknik gogorancah hanya mencakup sebagian kecil luas lahan sawah tadah hujan, seperti di Nusa Tenggara Barat (Fagi, 1986). Tetapi pada lahan rawa pasang-surut, lahan rawa lebak, dan lahan kering, teknologi tradisional budidaya padi masih dominan. Pada situasi demikian berdasarkan ciri-ciri biofisik, kimia dan sosial-ekonomi masing-masing dari lima lahan pertanaman padi tersebut, status *agroecosystem properties*nya seperti diilustrasikan dalam Gambar 1, dirinci penyebabnya (Tabel 19). Penyebabnya itu adalah landasan penelitian untuk perbaikannya.

Tabel 19. *Agroecosystem* properties dari lima lahan pertanaman padi dan penyebabnya.

Lahan pertanaman padi	Status*)		Penyebab
	R	T	
Sawah irigasi			
- productivity		v	- intensifikasi - tanah lebih subur oleh penggenangan
- stability		(v)	- relatif tinggi tergantung irigasi
- sustainability		v	- serangan hama/ penyakit dapat diatasi, kondisi cepat pulih
- equitability		(v)	- luas lahan garapan menentukan
Sawah tadah hujan			
- productivity		(v)	- gunakan teknik gogorancah
- stability	v		- fluktuasi curah hujan (El Nino)
- sustainability	(v)		- cekaman kering dikurangi dengan gogorancah
- equitability	v		- lokasi terpencil, luas kepemilikan sempit
Sawah pasang surut (sulfat masam)			
- productivity	v		- tanah tidak subur (masam)
- stability	v		- curah hujan tak menentu - kondisi kering pirit teroksidasi
- sustainability	v		- lapisan pirit mendangkal; salah pengelolaan tanah dan air
- equitability	v		- perbedaan tingkat kemasaman tanah (sulfat masam potensial vs SM aktual)

Tabel 19. Lanjutan.

Lahan pertanaman padi	Status*)		Penyebab
	R	T	
Sawah rawa lebak			
- productivity		(v)	- potensial tinggi dengan intensifikasi
- stability	v		- fluktuasi tinggi air genangan
- sustainability		(v)	- dengan teknologi tata air yang tepat, masalah cepat pulih
- equitability	v		- perbedaan akses ke saprodi karena lokasi
Padi lahan kering (gogo)			
- productivity	v		- tanah tidak subur
- stability	v		- curah hujan fluktuatif
-			- serangan blast
- sustainability	v		- erosi menggeruskan tanah dan sulit dipulihkan
- equitability	v		- akses ke saprodi berbeda - perbedaan kesuburan tanah - luas kepemilikan lahan

*) R = rendah, T = tinggi

Agroecosystem properties dari lahan pertanaman padi dalam Tabel 19 sejalan dengan deskripsi dari IRRI (1989). Pengenalan tentang *agroecosystem properties* dapat digunakan dalam merekayasa teknologi dan kelembagaannya melelui penelitian/ studi di lahan petani.

5. Konsekuensi gangguan terhadap kondisi keseimbangan (equilibrium) hutan hujan tropis

Keseimbangan hutan hujan tropis terganggu karena hutan dikonversi menjadi perkebunan. Konsekuensi terhadap *carbon sequestration* menjadi sorotan pemerhati lingkungan internasional karena pengaruhnya terhadap pemanasan global.

Hutan hujan tropis menghasilkan tumpukan dedaunan, ranting dan bangkai binatang dan mikroorganisme tanah selama ratusan bahkan ribuan tahun. Dalam kondisi kering dekomposisi bahan organik tersebut menghasilkan CO_2, H_2O dan energi; lapisan dalam dari tumpukan bahan organik yang sedang membusuk menjadi panas. Proses pembusukan bahan organik dalam kondisi oksidatif disebut *burning process* (Brady, 1974). CO_2 yang dihasilkan dijerap lagi oleh dedaunan tumbuh-tumbuhan dan digunakan untuk pertumbuhannya. Tumbuh-tumbuhan ini merontokan dedaunan dan ranting yang menyeimbangkan lagi bahan organik tanah. Di dalam tanah bahan organik yang mengalami pembusukan lanjut oleh mikroorganisme tanah menghasilkan selain CO_2 juga CO_3^- (karbonat) dan HCO_3^- (bikarbonat) dari senyawa yang mengandung Ca, Mg, K, dsb.

Kalau hutan konversi menjadi perkebunan kelapa sawit atau karet yang populasi tanamannya jauh lebih jarang dari hutan, dedaunan yang rontok pun akan berkurang; CO_2 yang dihasilkan dari deposit bahan organik, dan bahan organik baru hanya sebagian kecil yang dijerab daun pohon kelapa sawit atau karet, sebagian besar di antaranya lepas ke lapisan troposfir dan menambah banyak konsentrasi CO_2 di lapisan ini.

Pada keadaan tanah basah atau tergenang karena hutan dikonversi menjadi sawah dekomposisi bahan organik yang berlangsung pada kondisi reduktif akan menghasilkan gas metan (CH_4) dan CO_2; sebagian CO_2 dijerap tanaman, sebagian lagi ke litosfir bersama seluruh gas CH_4.

Maka, konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian dan perkebunan dikritik keras oleh pengamat lingkungan internasional. Alasan ini mungkin yang menyebabkan produk kelapa sawit Indonesia diboikot oleh sebagian Negara di Eropa. Presiden pada pemerintahan periode 2009/2010-2013/2014 menetapkan strategi untuk mewujudkan komitmen penurunan

V
STRATEGI PENINGKATAN EFISIENSI PENGGUNAAN SARANA PRODUKSI PERTANIAN

Dalam suatu diskusi di Jakarta yang diinisiasi oleh Pusat Kajian Buah-buahan Tropika (PKBT), Institut Pertanian Bogor, Wakil Menteri Pertanian saat itu, Dr. Bayu Krisnamurti menjelaskan bahwa nilai subsidi pupuk untuk komoditas pangan dapat membangun tiga pabrik pupuk baru. Penjelasan itu tidak dimaksudkan bahwa Pemerintah akan menghapus subsidi pupuk, tetapi mengingatkan tentang perlunya peningkatan efisiensi penggunaan pupuk. Pernyataan tersebut diperkuat oleh pemerhati pertanian dengan nama singkatan LAS dalam KOMPAS (24 Juni 2016) dan LAS/MAS (KOMPAS, 25 Juni 2016).

Pernyataan dari Wakil Menteri Pertanian sekitar 8 tahun lalu relevan dengan kondisi saat ini (tahun 2018). Besarnya dana subsidi pupuk, obat pembasmi hama/penyakit tanaman dan benih semakin membengkak. Sementara pembangunan di bidang infrastruktur pertanian (pembangunan sistem irigasi baru, rehabilitasi sistem irigasi lama) dan perluasan jaringan trasportasi darat, laut dan udara juga memerlukan dana yang sangat besar.

Diskusi dalam Bab V terfokus ke peningkatan efisiensi penggunaan sarana produksi pertanian pangan, khususnya efisiensi penggunaan pupuk.

Peneliti Balitbangtan telah banyak mempelajari teknik peningkatan efisiensi produksi padi dan palawija dari dana APBN dan dari dana kerjasama internasional dengan menggunakan berbagai pendekatan.

Persepsi Upaya Peningkatan Efisiensi

Pembahasan berikut diawali dengan persamaan persepsi antara penulis dan pembaca buku ini:

$$Em = \frac{Km}{Mm}$$

Dimana: Em = efisiensi per musim (tanaman tunggal); Km = keluaran atau hasil dari tanaman tunggal, dan Mm = masukan dari tanaman tunggal. Efisiensi produksi dalam satu musim diilustrasikan dalam Gambar 4, Bab II. Pada kenyataannnya petani tidak mengelola lahan pertanian hanya dalam satu musim, sehingga efisiensi penggunaan lahan diperhitungkan (lihat Gambar 5, Bab II). Ada 3 strategi untuk meningkatkan efisiensi:

Strategi 1: efisiensi akan naik kalau keluaran tetap, tetapi masukan turun.

Strategi 2: efisiensi akan naik kalau keluaran naik pada masukan tetap.

Strategi 3: efisiensi akan naik pada masukan yang turun, keluaran naik.

Strategi 1 bukan yang ideal, karena kebutuhan rumah tangga petani semakin besar. Strategi 2 cukup ideal dan strategi 3 adalah yang paling ideal.

Teknologi untuk meningkatkan efisiensi produksi komoditas pertanian akan bermakna secara nasional kaitannya dengan subsidi sarana pertanian kalau teknologi itu diterapkan oleh seluruh masyarakat petani. CGIAR (*Consultative Group of International Agricultural Research*) mendeklarasikan inisiatif ekoregional melalui IRRI dan ISNAR sebagai pedoman mengintegrasikan, mensinkronkan dan mensinergikan semua aspek penelitian dan pengembangan yang meliputi: (1) Daerah Aliran Sungai (DAS) hulu, tengah dan hilir; (2) Penelitian, penyuluhan, pengembangan; (3) Disiplin ilmu tanah, iklim, agronomi, penyuluhan, hama/penyakit, sosial-ekonomi, dsb.

CGIAR menyelenggarakan diskusi di Arheim, Belanda, untuk membahas perwujudan inisiatif ekoregional dalam praktek bertempat di de Bilderberg Hotel. Diskusi menghasilkan de Bilderberg Consensus:

- *Integrated Natural Resource Management* (INRM) adalah pedoman dalam merencanakan dan melaksanakan penelitian yang berwawasan ekoregional.
- *Research-development continum* adalah landasan strategis dalam diseminasi hasil penelitian. ISNAR (*International Service for National Agricultural Research*) mengartikan *research-development continum* berwawasan ekoregional (Kotak 6).

Kotak 6 : Ekoregional dalam diseminasi hasil penelitian

- Ekoregional adalah kawasan yang mempunyai karakteristik biofisik dan sosial-ekonomi sama, sehingga hasil penelitian di satu lokasi dalam kawasan itu dapat diterapkan ke seluruh kawasan.
- Ecoregional = recommendation domain

Duiker (1996)

Uraian di atas menunjukkan pentingnya pemetaan sumberdaya alam tanah dan iklim. Balitbangtan telah menempuh langkah awal yang strategis dengan menerbitkan 3 atlas:

(1) Atlas Sumberdaya Tanah Eskplorasi Indonesia Skala 1 : 1.000.000 (Puslittanak, 2000).

(2) Atlas Sumberdaya iklim Pertanian Indonesia skala 1 : 1.000.000 (Balitklimat dan Hidrologi, 2003).

(3) Atlas Arahan Tataruang Pertanian Indonesia Skala 1 : 1.000.000 (Puslitbantanak, 2001).

Gagasan Ilmiah Peningkatan Efisiensi

1. Analisis pertumbuhan tanaman

Penulis mereview secara utuh inventarisasi upaya para ilmuwan yang menekuni ilmu tanah yang menyangkut produksi pertanian. Tisdale dan Nelson (1975) melacak upaya untuk meningkatkan efisiensi produksi pertanian diawali oleh pendapatnya tentang pertumbuhan tanaman; faktor yang menentukan pertumbuhan tanaman diekspresikan dalam rumus:

$$G = f (x1, x2, x3, ……..xn)$$

Dimana: G = indikator dari pertumbuhan tanaman; x1, x2, x3, xn = beberapa faktor yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Kalau hanya satu faktor yang diperhatikan, maka rumusnya:

$$G = f (x1)x2, x3,…..xn$$

Disadari olehnya bahwa pertumbuhan tanaman tidak sepenuhnya linier (lihat Gambar 4 dan 5), sebagaimana dirumuskan, maka dievaluasi dan dianalisis gagasan-gagasan yang lain.

2. Beberapa rumus pertumbuhan yang ditawarkan

Rumus Mitscherlich

$$dy/dx = (A – y).C$$

Dimana: dy = kenaikan hasil yang disebabkan oleh kenaikan faktor pertumbuhan dx; A = hasil maksimum yang dapat diperoleh kalau semua faktor pertumbuhan optimum; y = hasil aktual karena digunakannya takaran faktor pertumbuhan tertentu; C = konstanta dari faktor pertumbuhan; C untuk nitrogen N, fosfat P_2O_5 dan kalium K berturut-turut adalah 0,122, 0,60 dan 0,40. Rumus Mitscherlich menuai banyak kritikan karena nilai C berbeda menurut jenis tanaman pada kondisi iklim yang berbeda. Jadi, nilai C dari rumus Mitscherlich tidak tetap atau berubah menurut kondisi lingkungan.

Rumus Spillman

Beberapa tahun setelah Mitscherlich, Spillman mengusulkan rumus baru:

$$Y = M\ (1 - R^x)$$

Dimana: Y = besarnya nilai indikator pertumbuhan yang diperoleh (a.l hasil); M = hasil maksimum yang mungkin dicapai kalau semua faktor pertumbuhan optimum, R = konstanta, x = jumlah faktor pertumbuhan.

Dari pengamatannya, Spillman menyederhanakan rumusnya menjadi:

$$Y = A\ (1 - 10^{-cx})$$
$$Y = A - A.10^{-cx})$$
$$A - Y = A.10^{-cx}$$
$$\log (A - y) = \log A + \log 10^{-cx}$$
$$\log (A - y) = \log A - cx$$

Dimana: y = hasil akibat pemberian sumber pertumbuhan x pada takaran tertentu, dan C = konstanta; kalau nilai indeks A = 100, maka c = 0,301, dan rumus ditulis:

$$\log (A - y) = \log A - 0{,}301X$$

A adalah ekspresi dari hasil maksimum yang nilainya adalah 100% potensi hasil, dan c = 0,301, maka rumus:

$$\log (100 - y) = \log 100 - 0{,}301X$$

kalau unit faktor pertumbuhan relatif dinilai 1, maka:

$$\log (A - y) = \log 100 - 0{,}301\ (1)$$
$$\log (A - y) = 2{,}0 - 0{,}301$$
$$\log (A - y) = 1{,}699$$
$$100 - y = 50$$
$$y = 50$$

Kalau jumlah faktor pertumbuhan dinaikkan menjadi 2 unit, maka rumus menjadi:

$$\log (A - y) = \log 100 - 0{,}301\ (2)$$
$$\log (A - y) = 2{,}0 - 0{,}602$$
$$\log (A - y) = 1{,}398$$
$$100 - y = 25$$
$$y = 75$$

Jumlah unit dari faktor pertumbuhan dinaikkan berturut-turut dari 3, 4, 5, ….10; hasil perhitungan ditunjukkan dalam Tabel 20.

Tabel 20. Penambahan jumlah unit faktor pertumbuhan menurunkan hasil dan kenaikan hasil.

Jumlah unit faktor pertumbuhan	Hasil (%)	Kenaikan hasil (%)
0	0	-
1	50	50
2	75	25
3	87,5	12,5
4	93,75	6,25
5	96,88	3,125
6	98,44	1,562
7	99,22	0,781
8	99,61	0,390
9	99,80	0,195
10	99,90	0,098

Sumber: Tisdale dan Nelson (1975)

Tabel 20 ini memperkuat asumsi bahwa upaya untuk meningkatkan hasil tanaman pada lahan yang kesesuaiannya sedang atau marginal dengan menambah makin banyak unit komponen teknologi agar hasilnya sebanding dengan hasil di lahan yang sesuai akan menghasilkan B/C ratio < 1,0 (Gambar 11).

3. Konsep mobilitas unsur hara Bray

Konsep ini adalah modifikasi dari Mitscherlich –Spillman – Baule untuk unsur hara yang tidak mobil di tanah. Konsep mobilitas unsur hara dari Bray, berlandaskan konsep dari Mitscherlich, bahwa unsur hara fosfor (P_2O_5) dan kalium (K_2O) yang terikat dalam kompleks adsorpsi di dalam tanah, maka relatif tidak mobil, namun harus tersedia dalam persentase yang sesuai dengan kebutuhan tanaman agar menghasilkan. Rumus, berdasarkan konsep mobilitas unsur hara dari Bray (*Bray's Nutrient Mobility Concept*), adalah:

$$\text{Log } (A - y) = \log A - C_1 b - CX$$

Di mana: A dan y telah diuraikan di depan, C_1 = konstanta sebagai representasi dari efisiensi dari b (jumlah unsur hara fosfor atau kalium yang tersedia di dalam tanah (dianalisis dengan cara yang dianjurkan), C = efisiensi dari pupuk fosfor atau kalium yang diberikan sebagai pupuk fosfor (SP-36) atau pupuk kalium (KCl). Faktor yang menentukan nilai C_1 dan C adalah jenis tanah, populasi dan jenis tanaman yang ditanam, seperti jagung, kedelai, gandum, pola tanam serta bentuk dan distribusi unsur fosfor atau kalium, dsb. di dalam tanah.

4. Konsep Baule unit dalam perhitungan kebutuhan pupuk

Dalam diskusi sebelumnya tampak perhatian para ahli terhadap satu unsur hara yang ketersediaannya terbatas, misalnya nitrogen. Pada jenis tanah tertentu, seperti tanah KP Sukamandi (Isothermic Vertic Tropoquults) (Gambar 15) selain unsur N, unsur fosfor dan kalium juga diperlukan. Tisdale dan Nelson (1975) merumuskan takaran yang dibutuhkan dari tiga unsur hara:

$$Y = A\,(1 - 10^{-0,301x1})\,(1 - 10^{-0,301x2})\,(1 - 10^{-0,301x3})$$

$$\log Y = \log A + \log (1-10^{-0,301x1}) + \log (1-10^{-0,301x2}) + \log (1-10^{-0,301x3})$$

Baule unit digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan takaran faktor pertumbuhan (Kotak 7).

Kotak 7 : *Baule unit*

Takaran faktor pertumbuhan (al. pupuk) untuk memperoleh hasil 50% dari hasil maksimum

Tisdale dan Nelson (1975)

Nilai *Baule unit* yang dihitung dari hasil penelitian Mitscherlich untuk N, P_2O_5 dan K_2O, berturut-turut adalah 223, 45, dan 76 dalam pounds per acre. Angka ini banyak dikritik, karena tidak sama pada lokasi dan jenis tanaman yang berbeda. Kritik lainnya berkenaan dengan estimasi capaian hasil:

- kalau dua faktor pertumbuhan digunakan, masing-masing bernilai/menyumbang 1 baule unit; estimasi hasilnya = 50% x 50% = 25% terhadap hasil maksimum,
- kalau tiga faktor pertumbuhan masing-masing menyumbang 1 baule unit, estimasi capaian hasil = 50% x 50% x 50% = 12,5%.

Setelah membahas banyak matode yang telah dirinci oleh para ahli tanah pendahulu atau pelopor, Tisdale dan Nelson (1975) sampai kepada kesimpulan bahwa yang paling tepat dan akurat dalam menetapkan kebutuhan hara tanaman adalah dengan penelitian faktorial di lapang.

Sebagai contoh, kalau 3 takaran pupuk nitrogen dan 3 takaran pupuk fosfat dipelajari kombinasinya yang terbaik, penelitiannya disebut 32 faktorial dengan 9 perlakuan. Analisis statistik (rancangan percobaan dan rumus regresinya) digunakan.

5. Pemupukan berimbang

Selama ini pemupukan berimbang dipahami dan dianjurkan sebagai pemupukan N (urea/Za), P (SP-36) dan K (KCl) lengkap, berupa pupuk tunggal atau pupuk majemuk tanpa perhatian terhadap sumbangan N, P dan K dari tanah. Rumus yang dipublikasi oleh Follet *et al*. (1984) mengklarifikasi pemahaman yang benar tentang pemupukan berimbang.

$$RN_{tn} = \Sigma\ (APt + AR_{at} - RM_{at} - L_{at})$$

Di mana:

RN_{tn} = hara anorganik dan organik tersisa dalam tanah pada waktu akhir,

AP_t = hara anorganik dan organik yang terkandung dalam tanah pada waktu awal,

AR_{at} = hara anorganik dan organik yang ditambahkan (pupuk) ke dalam tanah dalam interval waktu,

RM_{at} = hara yang dijerap dan diangkut tanaman dalam interval waktu,

L_{at} = hara anorganik dan organik yang hilang dan tidak terjangkau oleh akar tanaman dalam interval waktu,

t = waktu awal

tn = waktu akhir

at = interval waktu pada periode t → tn

Di dalam tanah dalam waktu yang relatif panjang tidak dapat dibedakan hara apa yang berasal dari pupuk anorganik, pupuk organik dan dari mineral tanah. Rumus ini dapat diperjelas oleh Gambar 3. Berbagai jenis tanah mempunyai ciri fisik, kimia dan biologi yang berbeda, sebab itu nilai dari parameter dalam rumus tersebut berbeda pula. Maka, pengetahuan tentang tanah menjadi sangat penting.

Kasus ketidakseimbangan unsur hara dapat terjadi pada lahan pertanaman padi sawah, walaupun sistem persawahan meningkatkan ketersediaan unsur hara makro (P, K, Ca, Mg, S) dan unsur hara mikro (Ponnamperuma, 1985). Pemupukan N, P dan K pada takaran berat dan penanaman varietas padi unggul yang berumur lebih pendek dari padi varietas lokal memungkinkan pertanaman padi terus-menerus, dapat menyebabkan perubahan reaksi fisiko-kimia di lapisan perkaran. Akibat dari itu terjadi pelandaian, bahkan penurunan laju kenaikan produksi padi di sentra produksi padi di Asia. Maka, komunitas peneliti padi internasional menginisiasi Mega Project dengan tema *Reversing Trends of Declining Productivity of Rice*, yang dikoordinasikan oleh IRRI. Indonesia berpartisipasi dalam proyek penelitian ini (Fagi *et al*., 2003). Hasil penelitian tersebut menyimpulkan (IRRI, 1999), bahwa:

(1) Pelandaian/penurunan produktivitas padi sawah intensif memang terjadi, tetapi relatif mudah dikoreksi,

(2) Tindakan yang bersifat kuratif untuk menyembuhkan lahan sakit, adalah:
   - pemupukan bahan organik yang seimbang dengan pemupukan anorganik
   - pengeringan petak sawah dalam jangka pendek atau penggunaan teknik irigasi bergilir agar rejim air tanah bersifat reduktif dan oksidatif silih berganti.

(3) Pemupukan P dan K disesuaikan dengan analisis tanah dan kebutuhan tanaman,

(4) Perbaikan waktu pemupukan nitrogen sesuai dengan stadia tumbuh kritis dari tanaman.

Teknologi yang dihasilkan oleh peneliti Balitpa (Balai Penelitian Tanaman Padi), sekarang BB padi, dikombinasikan dengan hasil penelitian Mega Project, dirumuskan dalam paket teknologi ICM (*Integrated Crop Management*) atau teknologi PTT (Pengelolaan

Teknologi dan Sumberdaya Terpadu) (Kotak 8). Komponen teknologi no. 7, belum dapat dianjurkan pada area pertanaman padi intensif, karena peta kandungan unsur hara P dan K dari tanah belum mencakup seluruh sentra produksi padi (Balitbangtan, 2007).

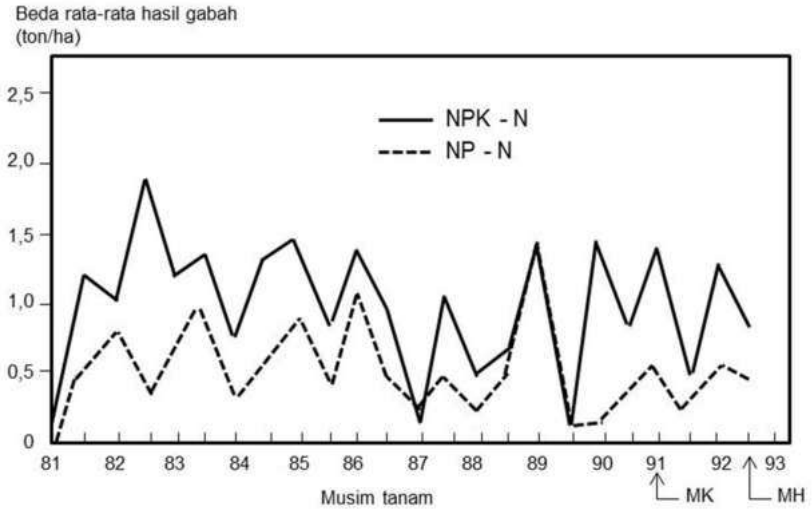
Kotak 8 : Paket teknologi PTT pada padi.

(1) Penggunaan benih bermutu (berlabel)
(2) Penanaman varietas unggul padi yang sesuai dengan lingkungan tumbuh dan pasar
(3) Pemupukan pesemaian agar bibit sehat
(4) Pengolahan tanah sempurna dan/atau sesuai dengan pola tanam
(5) Penanaman bibit berumur muda: ≥7 hari sampai ≤21 hari
(6) Tata tanam legowo
(7) Pemupukan anorganik berimbang (NPK sesuai dengan analisis tanah dan kebutuhan tanaman padi; waktu pemupukan N dengan pertanda Bagan Warna Daun)
(8) Pemupukan organik
(9) Pengaturan irigasi yang efektif dan efisien (irigasi berselang)
(10) Pengendalian gulma
(11) Penggunaan prinsip PHT dalam pengendalian OPT (hama/penyakit)
(12) Penerapan teknologi panen dan pascapanen yang baik

Sumber: IAARD (2013); diterjemahkan

Ketidakseimbangan unsur hara dapat terjadi melalui dua mekanisme: (1) tanah terbentuk dari bahan induk yang kandungan unsur hara tertentu sangat rendah, atau (2) persaingan antara kation, misalnya K^+ dengan Ca^{2+} dalam menempati kompleks adsorpsi. Kasus ini dijumpai di KP Sukamandi, BB Padi,

dari penelitian pemupukan N, P, K jangka panjang (tanah Ishothermic Vertic Tropaquults, pH agak masam, KTK rendah-sedang, P tersedia dan K dapat tukar rendah). Data dalam Gambar 15 menyimpulkan:



Gambar 15. Tanggap varietas padi IR38 terhadap pemupukan N, P, K periode 1981-93 dari percobaan jangka panjang di KP. Sukamandi.
Sumber: Fagi *et. al*. (2003)

(1) Tanah di KP Sukamandi memerlukan pemupukan N, P dan K untuk menunjang pertumbuhan optimal varietas IR36.
(2) Pemupukan P menjadi lebih efektif kalau dikombinasi dengan pemupukan K.

Pengaruh dominan dari pupuk kalium (unsur K^+) cukup meyakinkan; air irigasi dari waduk Jatiluhur mengandung kalsium (Ca) cukup tinggi, menyebabkan pH tanah sawah KP Sukamandi naik dari asam ke agak netral; Ca^+ akan menggeser K^+ dari kompleks adsorpsi dan tercuci ke lapisan tanah yang lebih dalam atau hanyut melalui aliran air permukaan (*run off water*).

Interaksi Komplementer antar Komponen Teknologi

1. Rintisan ide

Kotak 8 menunjukkan komponen teknologi paket PTT pada padi sawah. Di antara 12 komponen teknologi paket utamanya adalah varietas unggul baru, pupuk berimbang, air irigasi dan pengendalian hama/penyakit terpadu (PHT) karena aplikasinya dalam skala luas dan disubsidi oleh Pemerintah. Salah satu contoh dari pengaruh rejim air tanah terhadap efisiensi pupuk N pada tanaman jagung (Tisdale dan Nelson, 1975), ditunjukkan dalam persamaan kuadratik:

$$Y = b_0 + b_1 N + b_2 N^2 + b_3 D + b_4 D^2 + b_5 ND$$

Di mana: Y = hasil jagung, N = takaran pupuk N, D = hari terjadinya kekeringan atau indeks kekeringan, b_0 s/d b_5 = konstanta. Persamaan ini menunjukkan bahwa regim air tanah (*soil moisture regimes*) menentukan tingkat hasil jagung dan efisiensi pupuk nitrogen. IRRI menunjukkan hubungan korelasi yang sama antara hasil padi dengan D (jumlah hari tanpa genangan selama periode tumbuh). Fagi dan Sanusi (1983) menunjukkan pengaruh *stress day* terhadap hasil gabah.

Informasi ini memberi petunjuk bahwa air tanah (*soil moisture*) harus dipertahankan paling rendah sampai kapasitas lapang agar tanaman tidak terganggu oleh cekaman (*stress*) kekurangan air. Kandungan air di sekitar kapasitas lapang tergantung pada tekstur tanah dan bahan organik tanah; cara yang dianjurkan adalah menekan evaporasi dengan: (1) mulsa tanah (penggemburan tanah antara baris tanaman) atau *inter-cultivation*, (2) mulsa serasah tanaman (daun-daunan, jerami padi), dan (3) tanam jenis tanaman yang sesuai pada lahan tadah hujan yang curah hujannya tidak menentu, (4) tanam varietas yang tahan kekeringan.

2. Metode studi senjang hasil skala mikro

Beberapa tahun setelah Revolusi Hijau dicanangkan dan teknologinya tersebar di negara-negara penghasil beras, masih dijumpai adanya senjang hasil antara hasil padi di kebun percobaan dan hasil padi di lahan sawah petani. Peneliti IRRI dari berbagai disiplin ilmu merancang penelitian bertema *rice constraint study* (De Datta *et. al.*, 1978).

Studi ini diawali dengan pemahaman tentang kondisi biofisik, status teknologi petani dan sosial ekonomi masyarakat petani di lokasi sasaran. Sebagai misal: petani masih menanam varietas lokal, takaran pupuk belum sesuai anjuran, dan hama belum dikendalikan dengan prinsip PHT. Masing-masing faktor produksi diberi kode:

- Varietas padi : V0 = varietas lokal; V5 = varietas unggul
- Pemupukan : P0 = pemupukan cara petani; P5 = pemupukan anjuran
- Pengendalian hama : H0 = cara petani; H5 = anjuran

Perlakuan faktorial (*factorial treatments*) ditunjukkan dalam Tabel 21.

Tabel 21. Penelitian senjang hasil dengan perlakuan faktorial lengkap.

Kode perlakuan	Faktor pertumbuhan			Kombinasi VPH
	V	P	H	
1	V_0	P_0	H_0	$V_0P_0H_0$
2	V_5	P_0	H_0	$V_5P_0H_0$
3	V_0	P_5	H_0	$V_0P_5H_0$
4	V_0	P_0	H_5	$V_0P_0H_5$
5	V_5	P_5	H_0	$V_5P_5H_0$
6	V_0	P_5	H_5	$V_0P_5H_5$
7	V_5	P_0	H_5	$V_5P_0H_5$
8	V_5	P_5	H_5	$V_5P_5H_5$

Sumber: Fagi (2016)

- Penelitian faktorial lengkap (*complete factorial*) diselenggarakan di satu lokasi disebut *nucleus site* atau *mother trial*, oleh BBP2TP bersama Balit (terkait dengan komoditas).
- Penelitian faktorial tidak lengkap, hanya 3-4 kombinasi, diselenggarakan di banyak desa (ulangan dipencar) oleh BPTP bersama Dinas Kabupaten terkait. Kombinasi perlakuan (3-4 perlakuan) dirundingkan dengan Dinas; kombinasi ini mencerminkan tingkat manajemen usahatani:
  (a) Teknologi petani (M_0)
  (b) Teknologi dengan perlakuan optimum, tetapi memberikan keuntungan maksimum (M_1)
  (c) Teknologi dengan perlakuan maksimum dan memberi hasil yang maksimum (M_2)

Penelitian ini bernuansa diseminasi teknologi dan penyuluhan, disebut *baby trials;* lokasinya disebut *satellite sites*.

Sumbangan dari masing-masing faktor V, P dan H terhadap kenaikan hasil dapat dihitung:

$$\text{Sumbangan varietas (V)} = \frac{Y_2 + Y_5 + Y_7 + Y_8}{4} - \frac{Y_1 + Y_3 + Y_4 + Y_6}{4}$$

$$\text{Sumbangan pupuk (P)} = \frac{Y_3 + Y_5 + Y_6 + Y_8}{4} - \frac{Y_1 + Y_2 + Y_4 + Y_7}{4}$$

$$\text{Sumbangan PHT (H)} = \frac{Y_4 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{4} - \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_5}{4}$$

Di mana: Y = hasil (*yield*)

3. Evaluasi senjang hasil lintas propinsi atau lintas kabupaten dalam propinsi

Data statistik pertanian menunjukkan adanya kesenjangan hasil padi antar propinsi (Tabel 22).

Tabel 22. Senjang hasil padi rata-rata propinsi.

Tingkat hasil (ku/ha)	Propinsi
- Sangat rendah (≤30)	Bangka-Belitung, Kalimantan Tengah
- Rendah (31-35)	Kep. Riau, NTT, Kalimantan Barat, Maluku Utara
- Agak rendah (36-41)	Riau, Jambi, Bengkulu, Kalimantan Selatan, Kalimantan Timur, Maluku, Papua Barat, Papua
- Sedang (42-47)	NAD, Sumatera Selatan, Lampung, Sulawesi Tengah, Sulawesi Tenggara, NTB, Sulawesi Barat
- Agak tinggi (48-53)	Sumatera Utara, Sumatera Barat, Banten, Sulawesi Utara, Sulawesi Selatan
- Tinggi (54-59)	DKI Jakarta, Jawa Barat, Jawa Tengah, DI Yogyakarta, Jawa Timur, Bali, Gorontalo

Penanganan senjang hasil skala makro lebih kompleks dari penanganan dalam skala mikro, karena lebih luas faktor yang mempengaruhi, yaitu:

(1) Sistem produksi padi

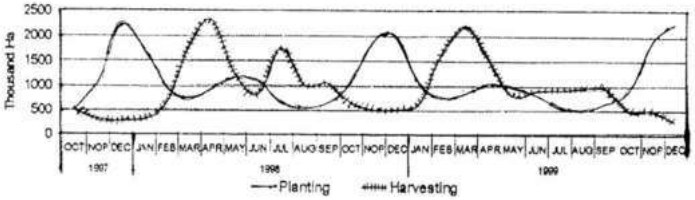
- Hasil padi rata-rata propinsi dapat berupa rata-rata hasil dari padi sawah irigasi, padi sawah tadah hujan, padi gogo dan padi lebak/pasang-surut,
- Tingkat hasil lintas propinsi disandingkan antara tingkat hasil dari sistem produksi yang sama; dari data ini dirancang penelitian senjang hasil dari sistem produksi yang sama,

(2) Varietas dan waktu tanam

- Varietas padi yang ditanam dapat berbeda antar propinsi, tetapi karena semuanya adalah varietas unggul, yang dibandingkan adalah ketahanannya terhadap hama/

penyakit; evaluasi biotipe hama/patotipe penyakit yang menyebabkan senjang hasil lintas propinsi.

- Di sentra-sentra produksi padi sawah irigasi padi ditanam dan dipanen setiap saat (Gambar 16). Artinya, fase



Gambar 16. Fluktuasi luas tanam dan panen; contoh pada MH 1997/98, MK 98, MH 1998/99 dan MK 1999.
Sumber: MEE *et. al*. (2000)

reproduktif tanaman padi dihadapkan pada intensitas cahaya matahari yang berbeda. Menurut Fagi dan De Datta (1981) masa aktif fotosintesis dari tanaman padi adalah 40-30 hari sebelum panen. Potensi hasil padi sawah pada kondisi air dan unsur hara cukup, serta bebas dari gangguan hama/penyakit, mengikuti persamaan (Yoshida, 1983 dalam Fagi dan Makarim, 1990):

$$\Delta W = \frac{Eu \times T \times S}{K} \times 10^4$$

Dimana:

ΔW = kenaikan bahan kering tanaman padi (g/m^2) yang dapat dikonversi ke kenaikan terhadap gabah pada kadar air tertentu

Eu = efisiensi penggunaan energi matahari (pada semua tingkat intensitas cahaya; Eu tertinggi 3,5% dan Eu sedang 2,5%)

T = periode pengisian gabah efektif (25-30 hari sebelum panen)

S = rata-rata intensitas cahaya matahari yang sampai ke permukaan daun

K = panas pembakaran karbohidrat (kal/gram dengan nilai 4000 kal/gram)

Di KP Sukamandi, BB Padi, Subang, Jawa Barat (jenis tanah hidromorf kelabu ~ Isothermic Vertic Tropaquults, pH ≤5,0, KTK = 12-16 meq/100 gram, kandungan bahan organik rendah) pada pemupukan N, P dan K optimal, hasil gabah menurut persamaan tersebut adalah 13 ton/ha pada MH dan 11 ton/ha pada MK; hasil rata-rata aktual rata-rata hanya 5-6 ton GKG/ha; hasil tertinggi pada minapadi mencapai 8 ton GKP/ha.

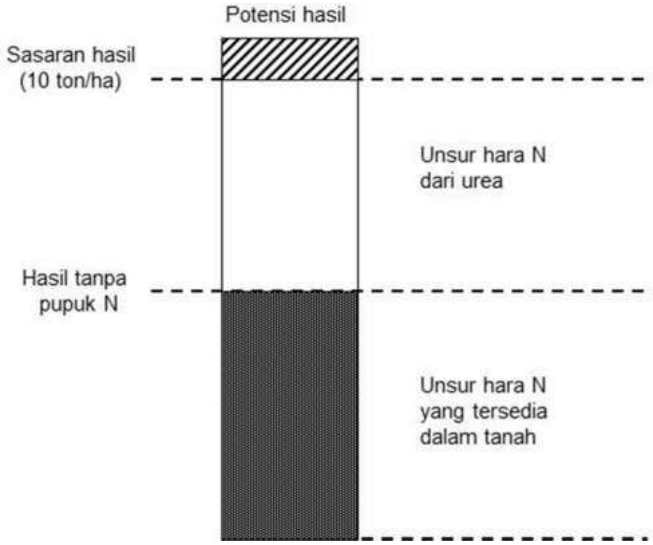
(3) Kesesuaian lahan

KTK yang indikator utamanya adalah tekstur tanah (kandungan partikel liat) menentukan potensi hasil. Pada kondisi suplai unsur hara optimum, air irigasi cukup, dan bebas dari serangan hama/penyakit, indeks hasil gabah ditunjukkan dalam Tabel 10.

Informasi ini memperkuat argumen bahwa efisiensi produksi harus dibahas secara komprehensif, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.

Site Specific Nutrient Management

Site Specific Nutrient Management (SSNM) bertujuan untuk memberi unsur hara pada tanaman dengan takaran optimal dan waktu yang tepat untuk mencapai hasil tinggi, efisien dalam penggunaan unsur hara oleh tanaman sehingga nilai investasi pemupukan juga tidak tinggi. Prinsip dari SSNM ditunjukkan dalam Gambar 17.

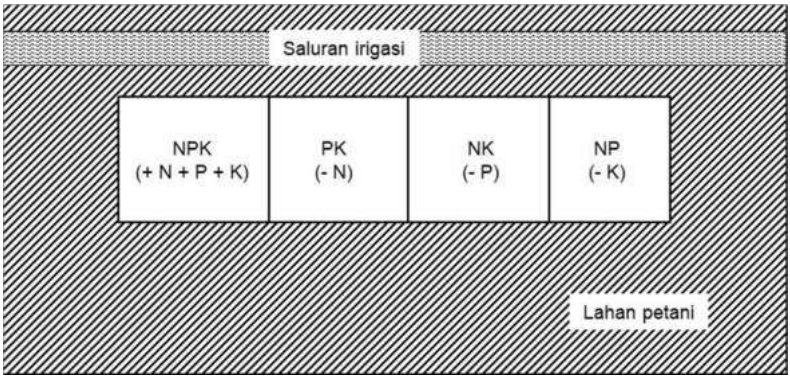


Gambar 17. Prinsip dari SSNM, contoh pada tanaman jagung.
Sumber: Canpotex dan IPNI (2007-2009)

SSNM pada tanaman jagung

Jagung dipilih sebagai contoh karena: (a) biji jagung adalah tanaman serealia terpenting kedua, (b) jagung ditanam pada lahan kering, sehingga mewakili tanaman palawija lain di lahan kering, dan (c) tanaman jagung sangat tanggap terhadap pemupukan dan peka terhadap kesuburan tanah.

Contoh dalam Gambar 17 tampak sederhana, tetapi SSNM untuk tanaman jagung perlu dukungan data dari penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu penelitian *minus-one* (Gambar 18).



Gambar 18. Skema penelitian omission plots pada jagung.
Sumber: Canpotex dan IPNI (2007-2009)

Dari penelitian ini data dikontruksi seperti berikut:

(1) Tanggap tanaman terhadap pemupukan, dan AEN (*Agronomic Eficiency* N dalam kg biji/kg N)
(2) Kurva hubungan antara AEN dengan hasil biji (dikelompokkan titik-titik tanggap dari berbagai lokasi menjadi kelompok rendah, sedang, tinggi); dari kurva ini dapat diketahui pengaruh iklim dan kesuburan tanah)

Dari analisis kimia tanaman dan biji, dapat diketahui:

(1) Kandungan N dari tanah, dari petak PK
(2) Kandungan P dari tanah, dari petak NK
(3) Kandungan K dari tanah, dari petak NP
(4) Kandungan N, P, K dari pupuk dari petak NPK

Anjuran pemupukan NPK jagung diestimasi dari target hasil (biji + hijauan); estimasi kebutuhan pupuk dari target hasil.

SSNM pada tanaman padi sawah

Kebutuhan tanaman padi terhadap unsur hara nitrogen bersifat universal. Tanpa pupuk nitrogen (terutama urea) hasil padi tidak akan memenuhi kebutuhan beras penduduk yang jumlahnya terus naik, dan budidaya padi tidak akan dapat memberi keuntungan yang memadai bagi petani.

Tanggap tanaman padi terhadap pupuk nitrogen bervariasi, bahkan antar sentra produksi, karena tanggap terhadap pupuk nitrogen tergantung pada varietas padi, musim (MH/MK), lokasi (jenis tanah), jenis pupuk dan cara pemberiannya. Sebab itu pengelolaan pupuk nitrogen menjadi perhatian lembaga riset nasional dan internasional, sehubungan dengan pengaruh regim air dari tanah sawah yang menyebabkan kehilangan nitrogen melalui volatilisasi NH_3, dan nitrifikasi-dinitrifikasi berupa N_2O dan N_2.

SSNM pupuk nitrogen berevolusi dari rintisan penelitian efisiensi penggunaan pupuk nitrogen oleh IRRI dalam kerjasama penelitian internasional. Resume dari penelitian-penelitian itu, adalah:

∇ *Partial efficiency concept*

- pupuk nitrogen harus diberikan pada stadia tumbuh kritis pada fase vegetatif untuk meningkatkan jumlah anakan dan pada fase reproduktif agar jumlah gabah isi per malai naik.
- waktu pemberian pupuk nitrogen dipengaruhi oleh varietas dan intensitas cahaya matahari; ada varietas yang efisien menggunakan unsur nitrogen pada intensitas cahaya matahari yang rendah.
- Fagi dan De Datta (1981) adalah peneliti terakhir di IRRI yang melaksanakan penelitian ini.

∇ ***INSFFER***

- INSFFER (*International Network on Soil Fertility and Fertilizer Evaluation in Rice*) berlangsung beberapa tahun mulai tahun 1976 di Asia Tenggara dan Asia Selatan; di antara banyak program pengelolaan pupuk nitrogen mendapat perhatian.
- untuk menekan kehilangan nitrogen dari pupuk nitrogen, pupuk nitrogen harus dibenamkan ke dalam lapisan reduksi; modifikasi pupuk nitrogen untuk memodifikasi pembenaman berupa *mudball* (urea dibungkus lumpur padat), urea briquette, urea supergranule (USG), *slow release urea* (*Sulfur Coated Urea*).
- pembenaman pupuk nitrogen dalam berbagai bentuk itu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk nitrogen (Mamaril et. al., 1985); hasil yang sama dilaporkan oleh Fagi dan Makarim (1990).

∇ ***Mega project***

Latar belakang dari *mega project* telah diuraikan, dan yang menarik dari rekomendasinya adalah perbaikan waktu pemberian nitrogen dengan menggunakan LCC (*Leaf Color Chart*). Ini adalah koreksi terhadap penelitian *partial efficicncy concept*. Tampaknya pertumbuhan tanaman padi sangat dinamis sehingga kebutuhan akan hara nitrogen tidak dapat dicukupi dengan pemberian pupuk nitrogen yang takarannya dibagi-bagi berdasarkan stadia tumbuh kritis. Ketidak-cukupan nitrogen dapat diidentifikasi dari warna daun. Nitrogen berpengaruh terhadap klorofil daun.

Teknik IT berkembang pesat ketika *mega project* berlangsung. Dengan menggunakan asumsi-asumsi berdasarkan jerapan hara yang disimpan di dalam gabah dan jerami, serta tingkat kesuburan tanah tingkat hasil gabah diestimasi.

Data/informasi yang diperoleh dari penelitian-penelitian sebelumnya dikompilasi dalam komputer, dan disintesis, sehingga

dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan yang diajukan dan diisi oleh petani, anjuran pemupukan dapat diputuskan; ada dua versi, yaitu: (1) PHSL (Pemupukan Hara Spesifik Lokasi) versi web; (2) PHSL versi HP (telpon genggam).
Kedua versi tersebut dilampirkan (Lampiran 4) (Balitbangtan dan IRRI)

Sintesis

Pemerintah cq Kementerian Pertanian dari regim satu ke regim lainnya menaruh perhatian khusus kepada peningkatan produksi padi, karena fungsi sosial dari beras yang sering bernuansa politis. Subsidi pupuk dari tahun 2014 sampai 2016 mencapai Rp21,5 triliun.

Perhatian terhadap jagung berkurang, karena tataniaganya, terutama tataniaga jagung hibrida didominasi oleh produsen benih dan produsen pakan. Pembiaran terhadap kedelai berlanjut, sehingga Indonesia terperangkap dalam impor kedelai.

Keseriusan pemerintah cq. Kementerian Pertanian untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk diujudkan dengan menerbitkan Rekomendasi Pemupukan N, P dan K pada Padi Sawah Spesifik Lokasi, yang landasan hukumnya diperkuat dengan Peraturan Menteri Pertanian No. 40/Permentan/OT.140/4/2007, April 2007. Permentan No. 40 ini berlaku bagi 21 propinsi penghasil utama padi. Tujuan utama dari Permentan No. 40 ini, adalah: (1) memacu laju kenaikan produksi padi sebesar 5% per tahun, (2) meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, terutama pupuk N, (3) menerapkan konsep pemupukan berimbang secara benar.

Akan tetapi dalam Permentan No. 40 ini ada klausul, yang menyatakan, bahwa:

- Anjuran pemupukan P dan K berdasarkan peta status hara 1 : 250.000 untuk 21 propinsi; maka, anjuran pemupukan P dan K

berlaku per kecamatan; seyogianya yang digunakan adalah peta status hara 1 : 50.000 (atau satu paket anjuran berlaku untuk 25 ha). Luas padi sawah per kecamatan sangat bervariasi.

- Berdasarkan fakta di atas, maka anjuran pemupukan ini (Permentan No. 40) berfungsi sebagai anjuran untuk pendistribusian pupuk ke setiap kabupaten/kecamatan (Lihat Lampiran 1, 2, 3)
- Untuk lebih memperkecil petak sawah sasaran, perlu peta status hara P dan K skala 1 : 50.000. Peta status hara skala operasional baru tersedia untuk delapan kabupaten (jalur pantura Jawa, Bali, Sumatera Utara dan Lombok.

Permentan No. 40 ini juga menganjurkan pendekatan petak omisi, artinya masih perlu pengkajian oleh BPTP bersama Dinas terkait di daerah. Metodenya telah disiapkan berupa SSNM (*Site Specific Nutrient Management*) atau PHSL (Pemupukan Hara Spesifik Lokasi) (lihat Gambar 18); dengan metode ini petani dapat minta anjuran rekomendasi pupuk untuk padi sawah di lahan miliknya melalui HP (Lampiran 4), tanpa data analisis tanah. Hasil penelitian dari petak omisi (Gambar 18) dari berbagai negara yang berpartisipasi dalam program penelitian, yang jumlahnya ribuan, disintesis berapa kebutuhan unsur hara N, P, K yang diperlukan berdasarkan tingkat hasil dan jerapan hara dari tanah dan pupuk yang tersimpan dalam jerami dan gabah.

VI
JENIS PUPUK UNTUK PERTANIAN DI DAERAH TROPIKA

Sejak tahun 1969 pertanian tanaman pangan Indonesia memasuki era baru dengan diterapkannya teknologi Revolusi Hijau pada tanaman padi sawah. Paradigma pertanian dan pola pikir dari para pihak secara bertahap berubah dari *low input*, tradisional *rice farming* ke *high input*, *commercial rice farming*. Berdasarkan analisis secara terpisah atau individual jaminan ketersediaan air irigasi, penanaman varietas padi unggul dan penggunaan pupuk memberikan sumbangan berturut-turut 26,5 dan 4% terhadap laju kenaikan produksi padi. Interaksi irigasi x varietas unggul x pupuk memberi sumbangan 75% sementara ekstensifikasi hanya menyumbang 25%, sehingga swasembada beras tercapai untuk pertama kalinya pada tahun 1984 (Wold Bank, 1982). Artinya faktor pertumbuhan (*growth factor*) atau faktor produksi (*production factor*) harus dikelola secara sinergis dan harmonis agar efektif. Para pengambil/penentu kebijakan harus bekerja secara integratif dan kooperatif dalam mensuskseskan pembangaunan. Rumus yang di buat berdasarkan *Bray's Nutrient Mobility Concept* adalah contoh dari interaksi antar faktor pertumbuhan/faktor produksi.

Dari pembahasan tentang segala aspek yang berkenaan dengan daya dukung tanah dan daya dukung iklim (ketersediaan air) tampak keterkaitan antara komponen teknologi PTT (*Integrated Crop Management*) satu sama lain. Inilah sebenarnya filsafat dari inisiatif ekoregional.

Pupuk hanya salah satu faktor terpenting dari produksi pertanian. Selama ini penyuluhan dan teknisi di lapang mengenal pupuk dari jenis dan kandungan hara dari informasi dalam labelnya. Pengetahuan tentang berbagai macam pupuk secara

detail dari semua pihak diharapkan akan lebih mengapresiasi fungsi pupuk dan mengimprovisasi pengelolaannya.

Informasi tentang pupuk ini diperoleh dari Fertilite, Prancis (Aubert, *et. al*. 1965) Pembaca disarankan untuk menelaah lebih mendalam uraian tentang pupuk oleh Tisdale dan Nelson (1975).

Jenis Pupuk yang Populer dan Prospektif

1.Urea

Penampilan

Urea, CO (NH_2)2, mengandung 45-46% N, berupa bubuk atau granula berwarna putih (1-2 mm); berat jenis 0,62 berat 50 kg ekuvalen dengan volume 73 liter

Kelarutan (solubillitas)

Larut dalam air secara sempurna tanpa meninggalkan residu dan menurunkan suhu air (panas kelarutan = 57,8 kalori per gram):

- suhu 0 ^{0}C, kelarutan dalam 100 l air = 67 kg
- suhu 10 ^{0}C, 84 kg
- suhu 20 ^{0}C, 105 kg

Sifat-sifat Lain

- Dapat membentuk banyak derivat: kalau bercampur dengan formaldehyde akan terbentuk resin urea-formeldehyde yang lengket: banyak digunakan dalam industri dan juga sebagai pupuk N.
- Dapat menyatu dengan bermacam materi organik/anorganik
- Dapat mencair (kondensasi) karena higroskopis.

Prinsip pembuatan

Merupakan pencampuran dari CO_2 dan NH_3

- CO_2 ditampung dari gas CO_2 komersial

- NH_3 berasal dari campuran N_2 dari udara dan H_2 yang diurai dari hidrokarbon; campuran N_2 dan H_2 diberi tekanan tinggi (120 kg/cm^2 atau 100 atmosfir) pada suhu 180^0 C

Reaksi sebagai pupuk

- Urea adalah pupuk yang bereaksi netral, tetapi di dalam tanah dapat mendorong kemasaman; pada kondisi yang serius beri $CaCO_3$ (75 bagian $CaCO_3$ untuk 100 bagian urea, 45% N).
- Di dalam tanah, urea akan mengalami 3 fase: (a) difusi ke dalam larutan air tanah dalam bentuk aslinya (b) terurai menjadi anonium dan karbondioksida, dan (c) nitrifikasi denitrifikasi.
- Sebelum terurai urea segera menyebar ke dalam larutan tanah; karena adanya enzim urease dari mikroorganisme tanah urea terurai menjadi NH_4^+ dan CO_2, yang menyebabkan pH naik (0,5-0,7 unit); perubahan pH berbeda menurut jenis tanah.
- NH_4^+ pada pH tinggi akan berubah menjadi NH_3 (volatisisasi) pada tanah yang bertekstur ringan, apalagi yang berkapur (*calcareous*); kehilangan NH_3 terdorong kalau urea disebar di permukaan tanah pada udara yang cerah dan kering; untuk menghindarinya urea di permukaan tanah harus ditutup tanah atau (dibenamkan).
- Laju nitrifikasi dipengaruhi oleh sifat tanah dan suhu; pada tanah masam, nitrifikasi berlangsung lebih cepat, dan makin meningkatkan pH air.
- Urea dapat berfungsi sebagai sumber nutrisi pakan yang mengandung nitrogen; penggunaannya harus diawasi; kandungan urea dalam campuran bahan pakan lain tidak lebih dari 3%.
- Urea kompatibel dengan *basic slag*, pupuk fosfat dan pupuk kalium; campuran harus segera diberikan ke dalam tanah.

2. Amonium sulfat

Penampilan

Amonium sulfat, $(NH_4)_2 SO_4$, populer disebut ZA (Zwafelsuur Ammonia), adalah pupuk yang tidak berwarna, berbentuk kristal *rhombohidral* atau lempengan, berat molekul 132, berat jenis yang diperdagangkan 0,8-1,0 gram/ml (800-1000 kg/m^3); 100 kg bervolume sekitar 120 liter,dengan kandungan N = 21%.

Kelarutan

Kelarutannya dalam air tinggi dan makin bertambah dengan makin panasnya suhu air.

Suhu ^{0}C	0	10	20	30	40	60	80	100
Kelarutan dalam air (gram AS dalam 100 gram air)	70,6	73,0	75,4	78,0	81,0	88,0	95,3	103,3

- Higroskopisitas rendah atau tidak hidrokopis (kelembaban kritis 70%). Maka dapat di bungkus dalam karung goni biasa.

Sifat-sifat lain

- Pupuk bereaksi masam; pH larutan 1% AS pada suhu 20 ^{0}C adalah 4,6
- Indeks kegaraman (*salt index*) adalah 69 (indeks kegaraman soda nitrat = 100); secara komersial AS adalah pupuk bereaksi masam (sulphuric), reaksi basanya lemah
- AS terurai dengan pemanasan dan melepas NH_3; pada suhu biasa NH_3 bisa menguap kalau AS dicampur dengan kapur cepat (*quick lime*);

$$(NH_4)_2 SO_4 + CaO \rightarrow Ca\ SO4 + 2NH_3 + H_2O$$

AS dapat menimbulkan ledakan jika dicampur dengan pereaksi yang kuat, termasuk klorin (*chlorates*)

Prinsip pembuatan

- Gas NH_3 dan CO_2 dimasukkan ke dalam suspensi kalsium sulfat $CaSO_4$

$$2\ NH_3 + CaSO_4 + CO_2 + H_2O \rightarrow (NH_4)_2\ SO_4 + Ca\ CO_3$$

  $Ca\ CO_3$ yang tidak larut dibuang melalui saringan, dan larutan $(NH_4)_2\ SO_4$ diuapkan menjadi kristal.
- Dapat juga dibuat melalui campuran dengan H_2SO_4 (*shulphuric acid*)

$$2\ NH_3 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2\ SO_4$$

NH_3 dapat disintesis menjadi N_2 dan H_2 pada tekanan tinggi atau dari distilasi cairan sebagai hasil samping dari gas batu bara

Reaksi sebagai pupuk

- AS adalah jenis pupuk yang paling awal dikenal oleh petani; disukai karena penggunaannya mudah dan kandungan N dan S yang sebanding.
- Aksidifikasinya tinggi karena di dalam larutan tanah terurai menjadi SO_4^{2-} dan nitrifikasi yang mengubah NH_4^+ menjadi NO_3^-; sekitar 100 bagian $CaCO_3$ diperlukan untuk menekan aksidifikasi 100 bagian $(NH_4)_2\ SO_4$ dengan kandungan N= 20,5% dan SO_3^{2-} = 59%.
- AS dapat dicampurkan dengan fosfat alam atau dikalsium fosfat; tidak dianjurkan pencampuran dengan KCl, K_2SO_4 dan Superposfat, karena akan mengeras di dalam penyimpanan.
- AS tidak dapat dicampurkan dengan kapur dari semua jenis dan dengan *basic slag* agar NH_3 tidak terbentuk dan menguap.
- Hindari pencampuran dengan herbisida yang bahan dasarnya *chlorate*; percampuran dapat menimbulkan ledakan.

3. Amonium nitrat

Penampilan

Amonium nitrat, NO_3NH_4 yang diproduksi di Inggris disebut Nitram, dengan kandungan nitrogen 35%.

- degradasi ganda dapat terjadi kalau bercampur dengan KCl dan subtansi bergaram lainnya.
- percampuran subtansi yang alakalis, akan menghasilkan NH_3.
- pupuk ini bereaksi netral dalam bentuknya yang murni; dalam bentuk pupuk akan menyebabkan kemasaman.
- indeks keragaman (*salt index*) adalah 104,7 (indeks kegaraman soda nitrat adalah 100, sebagai pembanding)

Kelarutan

- sangat larut di dalam air dan sangat higroskopis, cenderung memadat dan mengeras.
- koefisien higroskopisnya dipengaruhi oleh suhu: suhu 20 ^{0}C = 33,1; suhu 30 ^{0}C = 40,6; suhu 40 ^{0}C = 47,5.
- 100 liter air melarutkan 118,3 kg AN pada suhu 0 ^{0}C; pada suhu 20 ^{0}C melarutkan 192,3 kg.

Sifat-sifat lain

- AN murni tidak dipasarkan untuk pertanian, karena sangat banyak menyerap air sehingga berbentuk massa yang padat.
- AN mengandung 33,5% N berbentuk granuler yang dilapisi tipis dengan bahan yang anti kelembaban seperti $CaCO_3$; sebelum dilapisi AN harus kering; dalam bentuk seperti ini berat jenisnya sekitar 1,1; 100 kg AN = 94 liter.
- AN dengan kandungan N = 15-20% berbentuk granuler berupa campuran AN dengan liat atau $CaCO_3$;
- Nitron-chalk dikenal oleh petani Inggris, mengandung 46% $CaCO_3$ (sebagai campuran) dan 15,5% N.

- Di Eropa AN dengan kandungan 27% N difabrikasi dan populer.
- Berat jenis AN berbeda menurut ukuran dari granuler

AN granuler	Berat jenis relatif	Isi dari 100 kg AN
20,5%N	0,23-1,00	100-120 liter
27,5% N	0,77-0,95	105-130 liter
33,5-34,5% N	0,71-0,87	115-140 liter

Reaksi sebagai pupuk

- Pupuk Anomium nitrat (AN) mengandung nitrogen dalam bentuk yang berbeda yang di dalam tanah terurai menjadi ion NH_4^+ dan NO_3^- yang reaksinya berbeda.
- NH_4^+ larut di dalam larutan tanah diikat oleh kompleks absorpsi tanah; ini adalah bentuk ion sementara yang akan segera berubah menjadi NO_3^- pada suhu panas tetapi lebih bertahan dalam bentuk NH_4^+ pada suhu dingin.
- NO_3^- sangat larut di dalam air dan tidak diikat oleh kompleks adsorpsi.
- Potensi penggunaannya sebagai pupuk sangat luas; dapat digunakan sebagai pupuk dasar (*basal dressing*) dan pupuk susulan (*top dressing*).
- Pupuk ini dapat dicampur dengan pupuk lain segera sebelum diberikan, kecuali dengan material yang alkalis, seperti *basic slag* dan $CaCN_2$ (*Calcium cyanamide*).
- Dijual di pasar dalam bentuk granuler dan dikemas dalam kantong yang tidak tembus udara lembab.

4. Kalium nitrat

Penampilan

Kalium nitrat, NO_3K atau KNO_3, berupa kristal yang tidak berwarna, umumnya dijual dalam bentuk bubuk, larut dalam air terutama air panas, dengan berat jenis 1,928 gram/ml, berat molekul 101.

Kelarutan

- Tidak higroskopis; koefisien higroskopis pada berbagai suhu (sebagai perbandingan koefisien dari soda nitrat (16,5% N) = 100); indeks kegaraman dari KNO_3 = 73,6.

Suhu, ^oC	20 ^oC	30 ^oC	40 ^oC
Koefisien higroskopis	2,7	9,5	12,3

- Larut di dalam air

Sifat-sifat Lain

- Analisis pupuk KNO_3: kandungan N dalam bentuk NO_3^- adalah 13%, dan kalium (K_2O) 44%;
- Di dalam tanah pupuk ini menetralkan kemasaman tanah sebesar 23% dari kemampuan netralisasi dari $CaCO_3$
- Indikator kelarutannya: 100 l air melarutkan 13,3 kg pada suhu 0 ^0C dan 31,6 kg pada 20^0C

Prinsif pembuatan

- Dibuat melalui interaksi antara $NaNO_3$ (Natrium nitrat) dan KCI (Kalium klorida).

$$Na\ NO_3 + KCI \rightarrow KNO_3 + NaCl$$

  KNO_3 dan NaCl dipisahkan dengan air panas dan air dingin

- Dapat juga dibuat dari reaksi asam nitrat (HNO_3) dengan KCl (suhu dikontrol)

$$KCl + HNO_3 \rightarrow KNO_3 + HCl$$

Reaksi sebagai pupuk

- Keuntungan dari penggunaan KNO_3 sebagai pupuk adalah menyediakan unsur hara N dan K sekaligus.
- Dapat digunakan pada semua jenis tanah dan tanaman; pupuk ini menstimulasi pertumbuhan akar tanaman.
- Larutan KNO_3 1% dapat digunakan sebagai pupuk cair yang disemprotkan ke daun, terutama tanaman merambat, a.l. anggur.

5. Amonium fosfat

Penampilan

Amonium fosfat, $(NH_4)_2\ HPO_4$, telah lama digunakan sebagai pupuk. Penggunaannya semakin meluas (di Eropa).

- Berbentuk kristal, dan mengandung 21,2% N plus 53,8% P_2O_5 (*Phosphoric anhydride*)
- Agak alkalis, maka nitrogen berbentuk NH_3 cepat menguap dan hilang ke udara; pH larutan yang mengandung 1% pupuk ini 7,8; apalagi kalau bercampur dengan bahan yang alkalis.

Kelarutan

Cepat larut dalam air. Dalam 100 liter air dapat laut 62,1 kg pupuk ini pada suhu 20 ^{0}C

Sifat-sifat

- Dalam perdagangan ada proporsi N dan P_2O_5: 21-53-0, 19-49-0, 18-47-0 dan 16-48-0
- Senyawa $(NH_4)_2\ HPO_4$ yang relatif murni digunakan dalam industri
- Di pasar, yang dijual berbentuk granuler dengan berat jenis: 100 kg bervolume 87-110 liter, tergantung pada ukuran granuler dan kepadatannya.

Prinsip pembuatan

- Reaksi antara amonia (NH_3) dengan asam fosfat (H_2PO_3)

$$NH_3 + H_2PO_3 \rightarrow NH_4\ H_2PO$$

$$NH_3 + (NH_4)\ H_2PO_4 \rightarrow (NH_4)_2\ HPO_4$$

  Dalam pabrik pembuatannya dua tahap; reaksi tersebut dirancang secara bertahap

- Asam fosfat (berwarna hijau) dipersiapkan pada kondisi basah; proses ini yang umum diterapkan

Reaksi sebagai pupuk

- Amonium fosfat seakan sama dengan *Triple Super Phosphate* beramonia; pada tanah bereaksi netral atau alkalis, AF lebih mudah larut dan lebih tersedia bagi tanaman.
- Pupuk ini berhasil kalau diberikan pada alur penanaman tanaman serealia; dapat juga diberikan dalam bentuk cair, pupuk cair ini diinjeksikan ke dalam tanah untuk bunga potong dan buah-buahan
- Pupuk ini kompatibel dengan KCl, K_2SO_4, TSP dan ES (*single superphospahate*); jangan dicampur dengan bahan-bahan alkalis, seperti kapur, *basic slag* dan *cyanamide*.
- $(NH_4)_2\ HPO_4$ digunakan sebagai senyawa dasar dalam pembuatan pupuk majemuk 6-24-24, 10-20-20 dan 14-14-14.

6. Kapur nitrat

Penampilan

Kapur nitrat (*Nitrate of Lime*), $(NO_3)_2$ Ca. 4 H_2O, mengandung 15,0-15,5% N, berbentuk granuler yang dilapisi bahan tidak tembus kelembaban, dan dimasukan ke dalam kantong yang kedap udara.

Kelarutan

- Larut cepat di dalam air
  0 ^{0}C ~ 100 liter air melarutkan 147 kg
  20 ^{0}C ~ 100 liter air melarutkan 176 kg
- Sangat higroskopis; koefisien higroskopisnya tergantung pada suhu.

Suhu, ^{o}C	20 ^{o}C	30 ^{o}C	40 ^{o}C
Koefisien higroskopis	46,6	53,5	64,5

Sifat-sifat lain

- Pupuk ini bereaksi netral, maka dapat menetralkan kemasaman tanah.
- Indeks kegaramannya (kandungan 11,9% N) adalah 52,5 (bandingkan dengan soda nitrat = 100).
- Berat jenis relatif (tidak merata) : volume dari 100 kg pupuk = 87-100 liter

Prinsip pembuatan

- Asam nitrat yang dicairkan dengan air dicampur dengan kapur.

  $$4NO + 3\,O_2 + 2\,Ca\,(OH)_2 \rightarrow 2\,Ca\,(NO_3)_2 + 2\,H_2O$$

  Larutannya dipekatkan dengan evaporator, dan dinaikkan alkalinitasnya dengan Ca $(OH)_2$; cairannya dimasukkan/ dialirkan melalui drum yang dingin; cairan yang pekat diisap dikeluarkan dari drum tersebut,
- Kalau digunakan dolomit, selain kapur, akan dihasilkan *double nitrate of lime* menjadi *nitrate of lime-magnesia*.
- Pencampuran kapur nitrat dengan amonium nitrat menjadi amonia – *nitrate of lime*; pencampuran dengan urea menghasilkan *nitrate of lime*-urea.

Reaksi sebagai pupuk

- Karena cepat larut, maka cepat pula efektivitasnya terhadap tanaman; selain itu ammonium ionnya ($NH_4^{+)}$ tidak dijerap oleh kompleks adsorpsi.
- Pupuk ini baik digunakan sebagai pupuk susulan pada stadia pertumbuhan aktif; baik digunakan pada tanah berstektur berat.
- Pada keadaan kering, pupuk ini paling cepat tersedia bagi tanaman; tidak dianjurkan pencampurannya dengan pupuk lain.
- Pupuk ini dapat meningkatkan pH tanah (*alkalinising effect*), kapur nitrat 15,5% dan 28% CaO: 100 bagian kapur nitrat $\approx$ 21 bagian $CaCO_3$

7. Soda nitrat

Penampilan

Soda nitrat (*nitrate of soda*), NO_3Na (atau $NaNO_3$), berupa kristal yang tidak berwarna, mengandung 15,5-16% N dan soda (Na_2O). Selain itu juga mengandung sekitar 30 macam unsur mikro (*trace elements*).

Kelarutan

- Cepat larut di dalam air, tetapi kelarutannya tergantung suhu. Suhu 0 ^{0}C, 100 liter air melarutkan 73 kg. Suhu 20 ^{0}C, 100 liter air melarutkan 88 kg.
- Cepat menyerap uap air dari udara; kalau dipegang jari jemari akan ditempeli $NaNO_3$; koefisien higrokofitasnya.

Suhu, ^{o}C	20 ^{o}C	30 ^{o}C	40 ^{o}C
Koefisien higroskopis	22,9	27,6	29,9

Sifat-sifat lain

- Bereaksi netral, maka di dalam tanah dapat menetralisasi kemasaman tanah.
- Indeks salinitasnya tinggi; sebagai pembanding:
  NaCl = 153, 8
  $NaNO_3$ = 100

Prinsip pembuatan

- Sumber dari soda nitrat adalah deposit nitrat di Chile; ini adalah pupuk buatan pertama yang diekspor pada 1830.
- Material kasarnya disebut *caliche*, berupa bahan alam berwarna coklat yang di dalamnya tampak kilatan kristal. Di Chile utara, pada padang pasir dan terpencil tebal deposit 1,5-9 kaki (*feet*). Cadangan deposit 300 juta ton.
- Peneliti menduga kilatan petir berkali-kali meningkatkan N_2 dari udara berupa amonium-nitrat; reaksi dengan NaCl yang berupa deposit dari laut membentuk $NaNO_3$.
- Peneliti lain menduga deposit $NaNO_3$ berasal dari danau laut purba yang mengering.

Reaksi sebagai pupuk

- Reaksi di dalam tanah cepat dan langsung, nitratnya cepat dijerap akar, tetapi tidak terikat pada kompleks adorspsi.
- Tidak dianjurkan penggunaannya secara terus-menerus pada tanah karena akan membentuk lapisan permukaan yang mengeras, sebab natrium (Na) dapat merusak ikatan liat tanah (*disperse*), sehingga tanah memadat.
- Pupuk mampu membuat tanah menjadi alkalis; 100 bagian dari $NaNO_3$ sebanding dengan 29 bagian dari $CaCO_3$.
- Pupuk ini hanya dapat dicampur dengan KCl atau superfosfat sebelum diberikan; dapat juga dicampur dengan *basic slag*, fosfat mineral dan dikalsium fosfat.

- Harus disimpan di tempat kering dan dilindungi dari kelembaban.

8. Kalium klorida

Penampilan

Kalium klorida atau *potassium chloride* disebut juga *muriate of potash*, KCl, berat molekulnya 74,5, berupa kristal yang tidak berwarna, mengandung 52,4% K atau 63,2% K_2O (kristalnya berbentuk kubus); berat jenis 1,99.

- Pupuk KCl yang diperdagangkan 95% murni dan mengandung 60% K_2O, dan 4% NaCl.
- Warna KCl di pasar merah muda atau jingga yang di sebabkan oleh adanya sedikit besi (Fe) dan liat.

Kelarutan

- Cepat larut di dalam air, tetapi tergantung pada suhu air; kelarutan dalam 100 gram air:

  0 ^{0}C = 28,5 gram; 15 ^{0}C = 32,0 gram; 20 ^{0}C = 35,0 gram;

  30 ^{0}C = 37,0 gram; 100 ^{0}C = 57,0 gram

  Sifat ini sebaliknya dari NaCl
- Higroskopisnya sedang; koefisien higroskopisnya pada berbagai suhu:

Suhu, ^{o}C	20 ^{o}C	30 ^{o}C	40 ^{o}C
Koefisien higroskopis	14,3	16,0	18,8

- Indeks kegaraman (pengaruh terhadap salinitas tanah) dari KCl 63,2% K_2O adalah 114,3 (bandingkan NaCl = 100)

Sifat-sifat lain

- KCl yang digunakan dalam pertanian mengandung 50% K_2O
- Perbandingan indeks kegaraman (pengaruh terhadap salinitas tanah)

$NaNO_3$, 16,5% N	100,0
KCl pupuk pertanian, 50% K_2O	109,4
Standar KCl, 60% K_2O	116,3
KCl murni, 63,2% K_2O	114,3

- KCl dapat dicampur dengan semua jenis pupuk; kalau dicampur dengan bahan yang mengandung nitrogen, campuran itu harus segera diberikan/digunakan.
- KCl yang mengandung 40% K_2O disebut *sylvinite*; berat jenis 1,18-1,30.

Prinsip pembuatan

- Bahan mineral (bahan baku) dimurnikan dari kalsium sulfat, kieserite (magnesium sulfat), liat, *schists*, dan terutama NaCl.
- Tiga metode yang digunakan:
  (1) pemanasan berdasarkan perbedaan kelarutan dari KCl dan NaCl.
  (2) pengambangan (*flotation*) proses menggunakan bahan pelapisan kristal KCl.
  (3) proses penghalusan berdasarkan perbedaan berat jenis KCl (1,99) dan berat jenis NaCl (2,16); proses ini hanya dapat menghasilkan 40% K_2O.

Reaksi sebagai pupuk

- KCl adalah pupuk yang mengandung kalium, dan paling banyak digunakan, karena cocok digunakan pada semua jenis tanah untuk sebagian besar tanaman, kecuali tembakau dan *linseed*. Chlorine (Cl) menurunkan kualitas daun tembakau.
- Unsur K^+ diikat oleh kompleks adsorpsi tanah, maka dapat diberikan sebagai pupuk dasar tanpa kekhawatiran terhadap kehilangan K^+; dalam jangka panjang memperkaya K tanah.

- Pupuk KCl dapat diberikan dua sampai tiga minggu sebelum sebar benih atau tanam bibit; pada musim hujan waktu pemupukan dasar diperpendek.

9. Kalium sulfat

Penampilan

Kalium sulfat, K_2SO_4, berbentuk kristal *rhombic*, dengan kandungan K_2O = 48-52% (KCl murni mengandung 54% K_2O).

- Volume 100 kg K_2SO_4 = 75-85 liter bergantung pada ukuran kristal dan kepadatannya.
- Pupuk ini sangat stabil, dan dapat membentuk kristal bersama $MgSO_4$, $CaSO_4$ dan $AlSO_4$
- Berat molekulnya 174

Kelarutan

- Larut dalam air, kelarutannya naik secara gradual bersama dengan naiknya suhu air

Suhu, ^oC	0	15	25	50	100
Kelarutan K_2SO_4 (gram) dalam 100 gram air	7,3	10	12	16,5	24

Kelarutan K_2SO_4 adalah 1/3 dari KCl

- Pupuk ini menyerap uap air dari lingkungan sekitarnya pada kondisi tertentu, a.l suhu:

Suhu, ^oC	20	30	40
Koefisien higroskopisitas	1,5	3,7	4,3

Sifat-sifat lain

- K_2SO_4 murni bereaksi netral
- Indeks kegaraman K_2SO_4 = 46,1; sedangkan NaCl = 100
- Larutan yang jenuh mendidih pada suhu 101,4^{0}C
- Berat jenis 1,2-1,3

Prinsip pembuatan

- Kalium sulfat dua kali lipat kegaraman (*double salts of potassium sulphate*), $K_2SO_4.2\ MgSO_4$ adalah mineral alami yang disebut *langbeinite*, tetapi tidak dalam skala industri.
- Ada dua metode untuk membuat K_2SO_4, yaitu:
  (1) Kieserite, $MgSO_4.H_2O$ dikonversi menjadi MgSO4. 7 H_2O dalam air panas, dan ditambah KCl menjadi $K_2SO_4.\ MgSO_4$, berbentuk kristal.

$$K_2SO_4.\ MgSO_4 + 2\ KCl \rightarrow 2\ K_2SO_4 + MgCl_2$$

  (2) KCl dan H_2SO_4 dipanaskan pada awalnya suhu 350^0C, kemudian 850^0C

$$KCl + H_2SO_4 \rightarrow KHSO_4 + HCl$$

$$KHSO_4 + KCl \rightarrow K2SO_4 + HCl$$

  HCl digunakan untuk pembentuk Dikasium Fosfat.

Reaksi sebagai pupuk

- Dianjurkan untuk tanaman yang sensitif terhadap chlorida
- Dapat diberikan sebagai pupuk susulan
- Meningkatkan kualitas bunga-bungaan (warna bunga) dan daun, kecepatan berbuah dan rasa dari buah
- Dapat dicampur dengan bermacam pupuk seperti Kapur nitrat, Amonium nitrat, Urea dan Amonium sulfat, Soda nitrat dan Kalium nitrat

10. Superfosfat

Penampilan

Super fosfat adalah pupuk yang terkenal, sebelumnya disebut *monocalcium phosphate*, $Ca\ (H_2PO_4)_2.\ H_2O$; kadang-kadang disebut juga *single* atau *ordinary superphosphate*.

- Di dalam air hanya sebagian yang terlarut, karena ada unsur lain di dalam kandungannya yang tidak larut dalam air.

- Dijual dalam bentuk granuler atau bubuk, agak berbau khusus karena menggunakan H_2SO_4 dalam pembuatannya.

Kelarutan

- Bahan aktif dari pupuk ini larut dalam air, yaitu Ca $(H_2PO_4)_2$. H_2O.
- Pada suhu 20^0C, batas minimum kelembaban agar dapat menyerap uap air adalah 94,1%; koefisien higrokofisnya = 5,9 (rendah); suhu tidak terlalu menyebabkan perubahan pada indeks higroskopisnya, sebab itu pupuk ini tidak akan rusak pada kondisi kelembaban udara.

Sifat-sifat lain

- Indeks kegaramannya rendah dibandingkan dengan Soda nitrat.

  Soda nitrat 16,5% N = 100
  Superposfat, 16% P_2O_5 = 7,8
  Superfosfat, 18% P_2O_5 = 7,8
  Superfosfat, 20% P_2O_5 = 7,8

- Berat jenisnya = 0,80-1,20 (volume 100 kg Ca $(H_2PO_4)_2$. H_2O adalah 83-125 liter
- Di pasar, yang dijual adalah P_2O_5 yang larut di dalam air
- Pada tanah berkapur, Ca $(H_2PO_4)_2$. H_2O, mengalami transformasi menjadi Berzellus phosphate, $CaHPO_4$, $Ca_3(PO_4)_2$.

Prinsip pembuatan

- Mineral fosfat (*tricalcium phosphate*), $Ca_3(PO_4)_2$, yang tidak larut dalam air dikonversi menjadi *monocalsium photosphate* yang larut dalam air.

$$2\ Ca_3(PO_4)_2 + 6\ H_2SO_4 \rightarrow 4\ H_3PO_4 + 6\ CaSO_4$$

tricalsium phosfat	asam sulfat	asam fosfat	calcium sulfat

$$Ca_3(PO_4)_2 + 4\,H_3PO_4 \rightarrow 3\,Ca(H_2PO_4)_2$$

monocalcium fosfat

Kalsium karbonat ($CaCO_3$), adalah kandungan dari batuan fosfat bereaksi dengan asam sulfat.

$$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2$$

- Bahan baku kaya fosfor menghasilkan superfosfat yang kandungan P_2O_5 tinggi, tetapi mengurangi konsumsi H_2SO_4 per unit P_2O_5.

  100 kg bahan baku kering mengandung 65-85% $Ca_3(PO_4)_2$ membutuhkan 90-92 kg H_2SO_4 pada 53^0 Baume; kebutuhan H_2SO_4 makin tinggi kalau kandungan $Ca_3(PO_4)_2$ makin rendah pada 53^0 Baume.
- Bahan baku bantuan fosfat bereaksi dengan H_2SO_4 selama beberapa jam dalam suatu wadah (chambers disebut dens). Hasil reaksi diangkat dan disimpan dalam ruangan khusus (*heaps*) selama beberapa minggu; ini disebut proses pematangan, kemudian dilanjutkan dengan pengeringan.
- Proses pematangan sampai siap pakai, dengan kandungan rata-rata 18% P_2O_5 berlangsung satu bulan.

Reaksi sebagai pupuk

- Superfosfat yang diberikan ke dalam tanah akan larut dan meningkatkan konsetrasi ion fosfat dalam larutan tanah; sebagian diserap tanaman, sebagian diikat oleh kompleks adsorpsi dan hidrokosida.
- Pupuk ini cocok untuk semua jenis tanah dan tanaman.
- Pada tanah masam, kandungan Ca dan Mg rendah, ketersediaan fosfat berkurang karena terikat oleh kompleks adsorpsi dan oksida besi dan aluminium, maka pengapuran di perlukan.

- Pada tanah berkapur, Ca $(H_2PO_4)_2$ akan mengalami transformasi menjadi *Berzellus phosphate*, $Ca(HPO_4).Ca_3$ $(PO_4)_2$ yang tidak tersedia bagi tanaman; pada kondisi ini takaran Ca $(H_2PO_4)_2$ harus di perbanyak.
- Pupuk Superfosfat ini cocok bagi semuah tanaman, dan dapat diberikan sebagai pupuk dasar dan sebagai pupuk susulan pada stadia kritis tanaman.
- Pemberian pupuk ini bersama pupuk kandang dapat menekan kehilangan haranya karena menetralkan tanah alkalis.
- Tetapi, pupuk ini jangan dicampur dengan pupuk nitrogen (Amonium sulfat, Urea, Soda nitrat, Amonium nitrat, Kapur nitrat dan Kalium nitrat); kalau tercampur segera dipupukkan.

11. *Triple superphosphate*

Penampilan

Triple superfosfat (TSP) dibuat dengan proses yang sama dengan *monocalcium phosphate* atau superfosfat, tetapi konsentrasi P_2O_5 -nya lebih tinggi. Maka biaya pembuatannya lebih mahal, demikian pula harganya.

- Kandungan P_2O_5 = 45-50%, larut dalam air dan tidak higroskopis.
- TSP granuler dengan kandungan P_2O_5 tersedia 48% mempunyai berat jenis 1,0-1,2; volume dari 100 kg TSP adalah 80-100 liter.
- Indeks kegaramannya 10,1 (indeks kegaraman Soda Nitrat = 100).

TSP disebut juga Concentrated superphosphate, karena kandungan P_2O_5 nya tinggi, tetapi kandungan sulfurnya rendah.

Prinsip pembuatan

- Fosfat alam atau batuan fosfat direaksikan dengan asam fosfat, tidak dengan asam sulfat; asam fosfat dalam proses pembuatan basah disebut asam fosfat hijau atau *green phosphoric acid*; yang dalam proses kering disebut *white phosphoric acid.*
- Pembuatan *green phosphoric acid* adalah mereaksikan fosfat alam dengan H_2SO_4

$$Ca_3(PO_4)_2 + 2\ H_2SO_4 \rightarrow 2\ H_3PO_4 + CaSO_4$$

  H_3PO_4 dilarutkan dalam air dan dikentalkan dengan menguapkan air, sedang $CaSO_4$ dibuang dengan saringan H_3PO_4 tidak murni dan masih bercampur dengan senyawa Ca, Fe, Al dan Fl
- Pembuatan *white phosphoric acid* dengan pemanasan listrik (*electric furnaces*), dan mereduksi fosfat alam dengan karbon (C) pada suhu 1300 ^{0}C (ada silika).

$$Ca_3(PO_4)_3 + 5C + 3\ SiO_2 \rightarrow 3\ Ca\ SiO_3 + 5\ CO + 2P$$

  Fosfornya dioksidasi dengan udara, dan direaksikan dengan oksida menghasilkan H_3PO_4. Reaksi selanjutnya adalah:

$$Ca_3(PO_4)_3 + 4\ H_3PO_4 \rightarrow 3\ Ca(H_2PO_4)_2$$

- Reaksi berantai berikut menunjukkan jumlah H_2SO_4 yang digunakan untuk membuat TSP tidak berbeda dengan pembuatan Superfosfat.

$$2\ Ca_3(PO_4)_2 + 6\ H_2SO_4 \rightarrow 4\ H_3PO_4 + 6\ CaSO_4$$
$$Ca_3(PO_4)_2 + 4\ H_3PO_4 \rightarrow 3\ Ca(H_2PO_4)_2$$
$$3\ Ca_3(PO_4)_2 + 6\ H_2SO_4 \rightarrow 3\ Ca(H_2PO_4)_2 + 6\ CaSO_4$$

  Pembuatan TSP dengan *white phosphoric acid* membuat kandungan sulfat rendah = 3,5%, bahkan nol persen.

Reaksi sebagai pupuk

- Di dalam tanah TSP bereaksi sama dengan Superfosfat biasa (*ordinary superphosphate*); keduanya cepat bereaksi sebagai pupuk fosfat.
- Karena kandungan P_2O_5 nya tinggi, maka TSP digunakan dalam pembuatan pupuk majemuk yang konsentrasi unsur haranya tinggi, terutama untuk lokasi yang transportasinya terbatas.
- TSP pada berbagai keadaan dapat dicampur dengan KCl dan K_2SO_4. Pencampuran dengan pupuk nitrogen: Amonium sulfat, Amonium nitrat, Urea, Soda nitrat, Kapur nitrat harus dilakukan segera sebelum digunakan untuk mencegah pemadatan campuran itu.
- Tidak dianjurkan pencampuran TSP dengan *basic slag* atau kapur, karena alkalinitas yang terbentuk dapat mengurangi ketersediaan P_2O_5.

12. Dicalcium phosphate

Penampilan

Dicalcium phosphate atau *precipated calcium phosphate*, $CaHPO_4$, berbentuk bubuk mikrokristal halus berwarna putih.

- Kandungan P_2O_5 berdasarkan kalkulasi adalah 24,25%; kandungan P_2O_5 komersial 38-40%.
- Berat jenisnya 0,61-0,71 (volume 100 kg pupuk adalah 140-165 liter).
- Bereaksi netral; secara kimia tidak reaktif dan sangat baik stabilitasnya dalam tanah dan dalam campuran dengan pupuk lain.
- Tidak larut dalam air, tetapi larut dalam larutan amonium sitrat.

Prinsip pembuatan

- Dibuat dari batuan fosfat atau dari tulang yang bebas dari gelatin.
- Dua tahap dari proses pembuatannya:
  (a) Tricalcium phosphate dari batuan atau tulang dilarutkan dengan HCl

$$Ca_3 (PO_4)_2 + 6\ HCl \rightarrow 2\ H_3PO_4 + 3\ CaCl_2$$

  (b) Kapur ditambahkan, dan *dicalcium phosphate* akan mengendap.

$$H_3PO_4 + Ca\ (OH)_2 \rightarrow Ca\ HPO_4 + 2H_2O$$

Pengawasan secara hati-hati untuk memperoleh tingkat netralitasnya.

Reaksi sebagai pupuk

- Dalam larutan tanah yang mengandung CO_2, pupuk ini terlarut dan unsur fosfat akan tersedia bagi tanaman.
- Pada tanah berkapur (*calcareous*) pupuk ini akan memberi efek lebih baik; direkomendasikan untuk tanah masam yang kaya hidrokosida besi dan alumunium; pupuk fosfat yang mudah larut dalam air tidak dianjurkan pada tanah masam.
- Efektifitasnya lebih baik kalau pupuk ini dibenamkan ke dalam tanah sebelum tanam.
- Dapat dicampur dengan semua pupuk setiap saat, bahkan dengan *cyanamida* dan *Ammonium nitrate*.
- *Dicalcium phosphate* sering digunakan sebagai bagian bahan pembuatan pupuk majemuk.

13. Kalsium sianamida

Penampilan

- Calcium cyanamida, $CaCN_2$, mengandung 35% N, berwarna putih; penggunaannya sebagai pupuk hanya mengandung 18-

20% N. Kandungan 28% N dapat diproduksi sesuai permintaan.

- Berwarna hitam dalam bentuk granuler atau bubuk; yang berbentuk bubuk dapat menimbulkan iritasi, maka dicampur dengan bahan anti iritasi.
- Kandungan kapurnya mencapai total 60% CaO (*quick lime*), maka bereaksi alkalis; alkahinitasnya = 63 untuk $CaCN_2$ dengan 21% N dan 54% CaO.

Prinsip pembuatan

- $CaCN_2$ dibuat melalui pemanasan calcium carbide (CaC_2) 1000 ^{0}C-1400 ^{0}C pada kondisi di mana N_2 dari udara bebas masuk ke dalam reaktornya.

$$CaC_2 + N_2 \rightarrow Ca\ CN_2 + C + 78\ kcal$$

Karbit yang digunakan mengandung 80% CaC_2. Kapur dan energi listrik adalah syarat mutlak dalam pembutannya.

- $CaCl_2$ dan CaF_2 adalah katalis untuk menangkap N_2 3-4%

Reaksi sebagai pupuk

- Di dalam tanah yang basah pupuk ini terurai dan melepaskan cynamide (H_2CN_2) yang berekasi dengan koloid tanah. Pada hampir semua jenis tanah, urea terbentuk:

$$2\ CaCN_2 + 2\ H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Ca(HCN_2)_2$$

$$2\ Ca(HCN_2)_2 + 2\ H_2O \rightarrow Ca(OH)_2.CaCN_2 + 3\ H_2CN_2$$

$$H_2CN_2 + H_2O \rightarrow CO(NH_2)$$

(urea)

Konversi cynamide menjadi urea berlangsung 2-7 hari; prosesnya lebih cepat pada tanah berstekstur halus yang basah daripada yang berstektur kasar dan kering. Urea akan selalu terbentuk kalau pH tanah sekitar 7.

- Pada tanah alkalis, pH >8, terbentuk CN_2H_2; urea tidak terbentuk, dan tidak tersedia bagi tanaman.

- $CaCN_2$ bereaksi lebih lambat dari pupuk yang mengandung amonia, maka harus diberikan lebih awal dari waktu tabur benih atau tanam bibit.
- $CaCN_2$ juga berfungsi sebagai herbisida dan beracun bagi pastura (rerumputan); kalau larutannya disemprotkan warna daun menjadi pucat dan tanaman layu-mati.

14. Basic slag

Penampilan

Basic slag berupa bubuk berwarna kelabu tua dan berat dengan berat jenis = 2,0; volume 100 kg dari pupuk ini 50 liter.

- Kandungan P_2O_5 bervariasi antara 14-22%; yang dikomersialkan mengandung 15-18% P_2O_5.
- Fosfat dalam pupuk ini tidak larut dalam air, tapi larut dalam kemasaman yang lemah; 2% asam sitrat (pereaksi Wagner) melarutkan 75% fosfat yang dikandung pupuk ini. Dalam praktek kelarutannya dapat mencapai 85-90%.
- Selain kandungan fosfatnya, bahan untuk pupuk harus memenuhi tingkat kehalusannya 100 mesh.
- Kisaran komposisi dari campurannya, adalah:

Total asam fosfat	Asam fosfat tersedia	Total kapur (CaO)	Total magnesia (MgO)	Total sulfat
15-18	13,5-16,5	45-50	2-5	0,5

Elemen lain yang dikandung dalam pupuk ini dalam konsentrasi yang sangat rendah adalah MnO, silika, oksida besi, tembaga, cobalt, boron dan molebdenum.

Prinsip pembuatan

Basic slag adalah hasil samping dari pabrik baja yang dikenal juga sebagai Thomas slag dan Thomas photosphate. Peleburan besi menghasilkan besi kasar (*pig iron*) yang mengandung fosfor.

- Fosfor dan elemen lain yang tidak dikehendaki, seperti a.l. sulfur, dihilangkan dengan oksidasi, bersamaan itu akan dimurnikan juga dari kapur dan dolomit.
- Setelah dingin *slag* yang dihasilkan digiling; adakalanya *slag* itu masih lunak, dan dimasukkan ke tangki pendingin yang menghasilkan *basic slag* granuler.

Reaksi sebagai pupuk

- Pelepasan fosfat dari pupuk berlangsung lambat (*slow release*); lebih cepat terlepas pada tanah masam dari pada tanah yang netral.
- Kalsium fosfat dalam bentuk dasarnya akan bereaksi dengan air membentuk dikalsium fosfat; reaksi akan lebih ke kanan

  $$Ca_3(PO_4)_2.CaO + 3\ H_2O \rightarrow 2\ CaHPO_4 + 2\ Ca(OH)_2$$

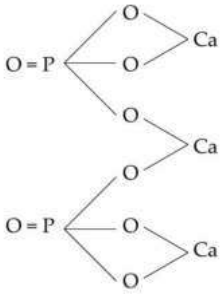
  kalau di dalam larutan tanah ada H_2CO_3 atau tanah masam akibat reaksi dengan $Ca(OH)_2$.
- Jadi, pupuk cocok diberikan pada tanah masam, karena akan terbentuk kapur (CaO) dan H_2PO_4.
- Pupuk ini harus diberikan lebih awal sebelum tabur benih atau tanaman bibit.
- Pupuk ini dapat dicampur dengan pupuk kalium, seakan memupuk dengan *slag* berkalium.
- Jangan dicampur dengan pupuk Amonium nitrat; Urea dan AS (ZA) dapat diberikan bersamaan dengan pemberian *basic slag*, tetapi jangan dicampur dan diaduk.

15. Fosfat alam

Penampilan

Deposit fosfat alam terjadi secara alami; *tricalcium phosfat* di manapun deposit ini berada umumnya berasosiasi dengan *calcium fluoride*, membentuk rumus kimia $Ca_3(PO_4)_2$, CaF_2; tetapi $Ca_3(PO_4)_2$ menyumbang lebih dari 80% dari asosiasi tersebut.

- Deposit terbesar berada di Afrika Utara, Togo, Florida, kepulauan dan Oceania dan Pasifik.
- Dalam semua fosfat alam selalu ada feri oksida (Fe_2O_3) dan alumunium oksida (Al_2O_3); kandungannya terbanyak dibanding dengan unsur lain, yaitu: F, MgO, Cr_2O_3, ZnO, TiO_2, V_2O_5, CuO, MnO_2, As_2O_3, U dan Ag.
- Fosfat alam yang digunakan sebagai pupuk umumnya mengandung 28% P_2O_5 dengan berat jenis 1,3 (volume dari 100 kg pupuk adalah 75 liter.
- Warnanya kelabu muda, berbentuk bubuk; pupuk yang diperdagangkan melewati seringan 300 mesh.
- Formulanya $Ca_3(PO_4)_2$; susunan molekulnya berbentuk kristal mikro (diameter 20-100 μ); kalau dapat dilihat dengan mata



telanjang disebut kristal makro, dan disebut *crypto-cristalline* kalau tidak terlihat di bawah mikrosof biasa.

- Secara mineralogi tergolong apatit.

Asal muasal dari deposit

Ada 3 teori tentang asal muasal dari deposit fosfat alam

- Fenomena alam; pengendapan fosfor dari larutan air laut kuno pada suhu yang hangat dan diisi oleh CO_2.
- Fenomena alam bersama dengan pengaruh biologis, berupa akumulasi jangka panjang bahan organik, kerangka binatang

yang mengandung fosfor; hipotesis ini dibuktikan di Mesir, Afrika Utara lain dan Amerika Utara.

- Deposit yang masih muda terus berlangsung dari kotoran dan kerangka burung laut di pulau-pulau; pada iklim kering deposit yang mengandung fosfor dan nitrogen adalah guano; pada iklim basah, deposit itu hanya mengandung fosfat.
- Setelah deposit itu ditambang, kemudian diperkaya melalui proses yang disebut *floatation*.
- Deposit ini terus-menerus bertambah banyak; lebih dari 2/3 total deposit berada di Afrika Utara dan Amerika Serikat.

Reaksi sebagai pupuk

- Efektivitas dari fosfor alam sebagai pupuk tergantung pada sumbernya, kahalusan dari bubuk, curah hujan, sifat dari tanah, jenis tanaman dan pola tanam.
- Berdasarkan kristal dari pupuk, ada yang keras dan lunak; yang lunak dapat segera diaplikasikan; pupuk jenis ini harus diaplikasikan dengan takaran yang lebih banyak dari pupuk fosfat buatan.
- Fosfat alam diberikan sebagai pupuk dasar, khususnya pada tanah yang masam (pH < 6,5) dengan iklim basah. Tetapi ada tanaman yang mampu mengekstrak fosfat dalam tanah pada lingkungan perakarannya (*rhizospheres*), seperti tanaman kacang-kacangan, tanaman krusifera dan tanaman serealia (*buck wheat*).
- Penggunaan yang optimal dari fosfat alam adalah pada tanaman leguminosa dalam pola tanam pada tanah bertekstur sedang sampai berat yang mengandung bahan organik.
- Fosfat alam adalah bahan baku dari pupuk majemuk.

16. Phospal

Penampilan

Phospal (*thermally treated phosphates*), berwarna kuning kecoklatan dan pucat dengan berat jenis 1,2 (volume 100 kg phospal adalah 85 liter).

- Kehalusan > 100 mesh, tidak higroskopis (pada udara yang lembab < 1% uap air yang dijerap)
- Bereaksi netral, asam fosfat larut dalam asam sitrat 26,4%
- Komposisi (dalam %)

P_2O_5 total	34,6
Al_2O_3 (alumina)	35,9
CaO (kapur)	10,9
Fe_2O_3 (oksida besi)	9,1
SiO_2 (silika)	2,9
TiO_2 (titania)	1,9
Unsur-unsur hilang (pengocokan panas)	2,6
Lain-lain	2,10

Asal muasal

- Mineral mengandung fosfat berasal dari Sinegal
- Bahan baku *aluminocalcic phosphate* mineral dibakar, dialiri Na_2CO_3 atau SiO_2; perlakuan ini membuat seluruh CaF_2 hancur.
- Larut dalam larutan amonium sitrat yang netral, sisanya tidak larut dalam air.
- Sebelum dibakar bahan baku dihancurkan dan dihaluskan; bahan ini dimasukkan ke dalam silinder yang berputar sambil di aliri uap panas.
- Pencampuran dengan air menghilangkan elemen-elemen beratnya berkurang; residunya diperkaya dengan asam fosfat.

Reaksi sebagai pupuk

- Reaksi dari phospal di dalam tanah mirip dengan *basic slag;* tidak cepat larut di dalam air.
- Pada tanah yang netral dan masam kelarutannya dalam larutan air sama dengan pupuk fosfat yang lain.
- Pupuk ini cocok sebagai pupuk dasar; takaran pupuk disesuaikan dengan 34% asam fosfat.
- Karena pupuk ini netral, maka dapat dicampur dengan semua pupuk nitrogen dan kalsium.

Deskripsi Standar Pupuk dalam Pasar Internasional

Uraian tentang deskripsi dari pupuk di muka dikeluarkan oleh Fertilite 52 tahun lalu (Aubet *et. al*., 1965). Improvisasi teknik pembuatan pupuk pasti terjadi agar efisien dan harga pupuknya berdaya saing di pasar internasional.

Canpotex dan IPNI (2017) menunjukan deskripsi standar dari pupuk yang dipasarkan secara internasional. Fabrik-fabrik pupuk di Indonesia telah menghasilkan ribuan ton pupuk dan digunakan dalam program intensifikasi melalui BIMAS, BIMAS Baru, Opsus, Insus, Supra Insus, Gema Palagung, P2BN dan P2BN- Upsus. Pembaca dapat mencocokkan deskripsi dari pupuk yang dibuat. Tabel 23 adalah deskripsi standar dari pupuk menurut Canpotex dan IPNI (2017).

Tabel 23. Jenis pupuk di pasar internasional = rumus kimia, kandungan hara dan berat jenis.

Nama dagang	Rumus kimia	Kandungan hara	Kemampuan	Berat jenis (kg/m^3)	Volume (l/kg)
Ammonium chloride	NH_4Cl	28% N 60% Cl	Acidifying	610	1.64
Ammonium nitrate	NH_4NO_3	33-35% N	Non-acidifying	850–1025	0.97–1.18
Ammonium phosphate	$NH_4H_2PO_4$	10–11% N 48–55% P_2O_5	Slightly acidifying	850–1200	0.83–1.27
Ammonium sulfate	$(NH_4)_2SO_4$	21% N 24% S	Acidifying	785–1200	0.83–1.27

Tabel 23. Lanjutan.

Nama dagang	Rumus kimia	Kandungan hara	Kemampuan	Berat jenis (kg/m³)	Volume (l/kg)
Calcium nitrate	$Ca(NO_3)_2$	16% N 28% CaO	Quick acting	1900	0.53
Potassium nitrate	KNO_3	13% N 44% K_2O	Quick acting	2100	0.48
Urea	$CO(NH_2)_2$	46% N	Acidifying	720–900	1.11–1.39
Diammonium phosphate (DAP)	$(NH_4)_2HPO_4$	18% N, 46% P_2O_5	Slightly acidifying	875–1200	0.83–1.14
Rock phosphate	$Ca_3(PO_4)_2$	28–35% P_2O_5, 46–50% CaO	Neutralising, 5–14% Citric acid soluble, very slowly acting	1200–1800	0.55–0.83
Single super phosphate (SSP)	$Ca(H_2PO_4)_2 H_2O$ + $CaSO_4$ 2 H_2O	16–20% P_2O_5 11–12% S 28-30% CaO	Fully water soluble, non-acidifying	900–1200	0.83–1.11
Triple super phosphate (TSP)	$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot 2\ H_2O$	46–48% P_2O_5 20% CaO 2% S	Fully water soluble, slightly acidifying	950–1350	0.74–1.05
Potassium chloride	KCl	60% K_2O 45% Cl	Muriate of potash (MOP)	950–1300	0.77–1.05
Potassium sulfate	K_2SO_4	50% K_2O 18% S	Sulfate of potash (SOP)	1150–1500	0.66–0.87
Potassium magnesium sulfate	K_2SO_4 2 $MgSO_4$	22% K_2O 18% MgO 22% S	Langbeinite	1400	0.71
Kieserite	$MgSO_4 \cdot H_2O$	17–27% MgO 22% S	Water soluble, quick acting	830	1.20
Dolomite	$MgCO_3 + CaCO_3$	2–20% MgO 30-47% CaO	Water insoluble, slow acting	depending on grinding	
Sodium tetraborate	$Na_2B_4O_7 \cdot 5\ H_2O$	14% B	Water soluble, quick acting	0.81	1230
Borax	$Na_2B_4O_7 \cdot 10\ H_2O$	11% B	Water soluble, quick acting	1.04	961
Ulexite (Boron atrocalcite)	$CaNaB_6O_9 \cdot 8\ H_2O$ $NaCaB_5O_6(OH)_6 \cdot 5\ H_2O$	13–14% B 14% CaO	Citric acid soluble, slow acting	1.4–1.95	531–700
Calcium borate (colemanite)	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	10% B		1.02	977
Copper sulfate monohydrate	$CuSO_4 \cdot H_2O$	35% Cu	Water soluble, quick acting		
Copper sulfate pentahydrate	$CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$	25% Cu	Water soluble, quick acting	0.79–1.20	830–1260
Copper chelate	Cu-EDTA	8–14% Cu	Water soluble, quick acting		

Sumber = Canpotex dan IPNI (2009)

Faktor Konversi Unsur Hara dari Pupuk dan Istilah dalam Pemupukan

1. Faktor konversi unsur hara

Dalam tulisan ilmiah dan popular, termasuk anjuran pemupukan, unsur hara ditulis elemen, senyawa, kation atau anionnya. Penyuluh di lapang menghitung dalam bentuk materinya. Dalam Tabel 24 ditunjukkan faktor konversi dari materi ke senyawa dan ke kation/anionnya untuk memudahkan perhitungan.

Tabel 24. Faktor konversi unsur hara dari pupuk dan sebaliknya.

Dari	X	Untuk menjadi/ dari	X	Untuk memperoleh
NO_3^-	0.226	N	4.426	NO_3^-
NH_3	0.823	N	1.216	NH_3
NH_4^+	0.777	N	1.288	NH_4^+
$CO(NH_2)_2$ -urea	0.467	N	2.143	$CO(NH_2)_2$ -urea
$(NH_4)_2SO_4$	0.212	N	4.716	$(NH_4)_2SO_4$
NH_4NO_3	0.350	N	2.857	NH_4NO_3
P_2O_5	0.436	P	2.292	P_2O_5
$Ca_3(PO_4)_2$	0.458	P_2O_5	2.185	$Ca_3(PO_4)_2$
K_2O	0.830	K	1.205	K_2O
KCl	0.632	K_2O	1.583	KCl
KCl	0.524	K	1.907	KCl
$ZnSO_4 \cdot H_2O$	0.364	Zn	2.745	$ZnSO_4 \cdot H_2O$
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0.227	Zn	4.398	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$
SO_2	0.500	S	1.998	SO_2
SO_4^{2-}	0.334	S	2.996	SO_4^{2-}
$MgSO_4$	0.266	S	3.754	$MgSO_4$
$MgSO_4 \cdot H_2O$	0.232	S	4.316	$MgSO_4 \cdot H_2O$
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.130	S	7.688	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$
$(NH_4)_2SO_4$	0.243	S	4.121	$(NH_4)_2SO_4$
SiO_2	0.468	Si	2.139	SiO_2
$CaSiO_3$	0.242	Si	4.135	$CaSiO_3$
$MgSiO_3$	0.280	Si	3.574	$MgSiO_3$
MgO	0.603	Mg	1.658	MgO

Tabel 24. Lanjutan.

Dari	X	Untuk menjadi/ dari	X	Untuk memperoleh
MgO	2.987	$MgSO_4$	0.355	MgO
MgO	3.434	$MgSO_4 \cdot H_2O$	0.291	MgO
MgO	6.116	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.164	MgO
MgO	2.092	$MgCO_3$	0.478	MgO
CaO	0.715	Ca	1.399	CaO
$CaCO_3$	0.560	CaO	1.785	$CaCO_3$
$CaCl_2$	0.358	Ca	2.794	$CaCl_2$
$CaSO_4$	0.294	Ca	3.397	$CaSO_4$
$Ca_3(PO_4)_2$	0.388	Ca	2.580	$Ca_3(PO_4)_2$
$FeSO_4$	0.368	Fe	2.720	$FeSO_4$
$MnSO_4$	0.364	Mn	2.748	$MnSO_4$
$MnCl_2$	0.437	Mn	2.090	$MnCl_2$
$MnCO_3$	0.478	Mn	2.092	$MnCO_3$
MnO_2	0.632	Mn	1.582	MnO_2
$CuSO_4 \cdot H_2O$	0.358	Cu	2.795	$CuSO_4 \cdot H_2O$
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.255	Cu	3.939	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$
$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	0.138	B	7.246	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$
$Na_2B_4O_7 \cdot 7H_2O$	0.123	B	8.130	$Na_2B_4O_7 \cdot 7H_2O$
B	3.230	B_2O_3	0.310	B

Catatan: tidak semua jenis pupuk dijual di kios-kios sarana produksi pertanian

Sumber: Canpotex dan IPNI (2007)

2. Kehalusan butiran pupuk

Kehalusan butiran pupuk (*fineness*) diatur melalui saringan (*sieves*); ukurannya adalah mesh, yang dinyatakan dalam nomor saringan (Tabel 25).

Tabel 25. Ukuran (nomor) saringan dan bukaan (diameter lubang saringan).

Standar Perancis		Standar Amerika	
Nomor saringan (mesh)	Bukaan lubang saringan (mm)	Nomor saringan (mesh)	Bukaan lubang saringan (mm)
300	0,053	-	-
200	0,075	200	0,074
150	0,100	150	0,104
100	0,150	100	0,147
20	0,850	20	0,833
12	1,65	10	1,651
8	2,31	8	2,362
6	3,30	6	3,327
5	4,60	4	4,699
1	21,60	1,5	18,850

Sumber: Aubert *et. al*. (1965)

3. Higroskopisitas

Higroskopisitas (*hygroscopicity*) adalah kemampuan untuk menyerap uap air dari udara. Pupuk yang menyerap uap air akan menjadi lembab dan basah, serta lengket; kalau kemudian kering, maka pupuk itu akan mengeras. Dalam keadaan demikian pupuk akan sulit dibenamkan ke dalam tanah atau disebar di atas permukaan tanah secara merata.

Pupuk tunggal yang unsur utamanya nitrogen lebih higroskopis dari yang unsur utamanya fosfat dan kalium (Tabel 26).

Tabel 26. Batas kelembaban maksimum di mana pupuk mulai menyerap uap air dalam kelembaban udara lebih tinggi.

Senyawa murni		Batas kelembaban udara kritis*)		
Pupuk tunggal	Rumus kimia	20 ^{0}C	30 ^{0}C	40 ^{0}C
Calcium nitrat	$Ca(NO_3)_2.4\ H_2O$	55,4	46,7	35,5
Ammonium nitrate	NH_4No_3	66,9	59,4	52,5
Sodium nitrate	$NaCO_3$	77,1	72,4	70,1
Urea	$CO(NH_2)_2$	80,0	72,5	68,0
Ammonium cloride	NH_4Cl	79,3	77,2	73,7
Ammonium sulphate	$(NH_4)_2\ SO_4$	81,0	79,2	78,2
Potassium chloride	KCl	85,7	84,0	81,2
Potassium nitrate	KNO_3	92,7	90,5	87,9
Potasium sulphate	K_2SO_4	98,5	96,3	95,7
Monoammonium phosphate	$NH_4H_2PO_4$	91,7	91,6	90,3
Monopotasium phosphate	KH_2PO_4	96,2	92,9	92,9
Monocalcium phosphate	$Ca(H_2PO_4)_2$	94,1	94,7	94,5

Sumber = Aubert, *et. al*. (1965)

*) Batas kelembaban kritis lebih dari batas kelembaban ini, pupuk mulai menyerap uap air

Tampak dalam Tabel 26 bahwa Calcium nitrate dan Ammonium nitrate sangat higroskopis, sedang Monopotassium phosphate dan Monocalcium phosphate tidak higroskopis. Pupuk campuran umumnya lebih higroskopis dari aslinya (Tabel 27).

Tabel 27. Higroskopisitas dari beberapa pupuk campuran.

Pupuk campuran	Batas kelembaban udara kritis
Ammonium nitrate/Urea	18,1
Ammonium nitrate/Calcium nitrate	23,5
Calcium nitrate/Photasium nitrate	31,4
Ammonium nitrate/Monocalcium phosphate	36,4
Calcium nitrate/ Sodium nitrate	37,7
Ammonium nitrate/ Monocalcium phosphate	38,6
Sodium nitrate/urea	45,6
Ammonium nitrate	46,3
Urea/Amonium sulfate	56,4
Urea/Ammonium chloride	57,9
Ammonium nitrate/Photassium nitrate	59,9
Ammonium Sulphate/Ammonium nitrate	62,3
Sodium nitrate/Potassium nitrate	64,5
Urea/Monocalcium phosphate	65,1
Urea/Potasium nitrate	65,2
Pottasium nitrate/Calcium sulphate	76,1
Monoammonium phosphate/Photasium sulphate	79,0
Potassium nitrate/Monocalcium phosphate	87,8

Sumber = Aubert *et. al*. (1965)

Definisi yang perlu dipahami oleh pembaca, karena sering disampaikan dalam tulisan/laporan:

- ∇ Koefisisen higroskopis = 100 – batas kelembaban kritis
- ∇ Batas terkecil dari kelembaban (batas kritis) adalah kondisi di mana tekanan partial dari uap air dan udara sama dengan tekanan uap air dari larutan pupuk yang jenuh.

Cara untuk meniadakan/mengurangi higroskopistas dari pupuk:

(1) dalam pembuatan: granulasi dari pupuk yang berbentuk bubuk dan dilapisi oleh bahan yang tidak higroskopis (misalnya NH_4NO_3 granuler dilapisi $CaCO_3$).
(2) dalam pewadahan: gunakan karung dilapisi bungkus yang kedap uap air.
(3) simpan di ruang yang selalu kering (*water proof*).

4. Indeks kegaraman

Indeks kegaraman (*salt index*) menggunakan $NaNO_3$ sebagai referensi standar. Indeks keragaman ini adalah ukuran dari perubahan tekanan osmosis dari larutan tanah akibat dari pupuk yang diberikan. Ini mengklasifikasi pupuk berdasarkan resiko yang timbul karena takaran pupuk yang berlebihan dan teknik pemupukan yang tidak bijaksana. Tabel 28 menunjukkan indeks kegaraman dari beberapa jenis pupuk.

Tabel 28. Indeks kegaraman beberapa jenis pupuk.

Jenis pupuk	Rumus kimia	Indeks kegaraman
Nitrate of soda (16, 5% N)	$NaNO_3$	100
Ammonium nitrate (35% N)	NH_4NO_3	105
Sulphate of ammonia (21% N)	$(NH_4)_2 SO_4$	69
Nitrate of potash (14% N)	KNO_3	74
Urea	$CO(NH_2)_2$	75
Monoammonium phosphate	$NH_4H_2PO_4$	30
Superphosphate (16% P_2O_5)	$Ca(H_2 PO_4)_2. H_2O$	8
Tripe superphosphate (48% P_2O_5)	$Ca(H_2PO_4)_2. 2H_2O$	10
Photasium chloride (63% K_2O)	KCl	114
Pothasium sulfhate murni	K_2SO_4	46

Sumber = Aubert *et. al*. (1965)

Efek salinitas bersifat additif, maka proporsional dari berat masing-masing pupuk dalam campuran:

$$\text{Salt index campuran} = \frac{\Sigma \text{ (persen pupuk x salt index)}}{100}$$

5. Aksidifikasi atau netralisasi

Pengaruh pupuk terhadap reaksi tanah setelah diberikan tidak tampak dari rumus kimia dari pupuk, tetapi akibat dari transformasinya melalui oksidasi ammonia dan senyawanya

menjadi asam nitrat. Kemampuan aksidifikasi atau netralisasi ditunjukkan dalam Tabel 29.

Tabel 29. Kemampuan aksidifikasi atau netralisasi beberapa jenis pupuk.

Jenis pupuk	Reaksi pupuk	
	Aksidifikasi	Netralisasi
Pupuk nitrogen		
Ammonium nitrate, 33,5% N	60	
Ammonium sulphate, 20,5% N	110	
Monoammonium phosphate, 11% N	59	
Diamonium phosphate, 16,5% N	88	
Cyanamide, 22% N		63
Potassium nitrate, 16% N		25
Soda nitrate,16% N		29
Pupuk fosfat		
Superphosphate	0	0
Dicalcium phosphate	0	25
Mineral phosphate (fosfat alam)	Alkalinisasi	
Pupuk kalium		
Photasium chlorate	0	0
Photassium sulphate	0	0

Sumber = Aubert *et. al*. (1965)

Sintesis

Pada tahun 1970-an komunitas penelitian pertanian khususnya penelitian tanaman padi menduga adanya ketidakseimbangan antara penggunaan pupuk nitrogen (N) dan pupuk sulfur (S), yang dapat menyebabkan ketidakseimbangan unsur hara tanaman. Konsekuensi dari ketidakseimbangan unsur hara itu adalah pelandaian kenaikan hasil dan produksi padi.

Di Indonesia, pupuk urea dan pupuk amonium sulfat yang mengandung unsur S dianjurkan secara massal dalam program intensifikasi padi. Maka, jumlah pengguna pupuk amonium sulfat makin meningkat, bahkan lebih tinggi dari pupuk KCl. Menteri

Muda Pertanian menghawatirkan hal ini, karena akan membebani anggaran pemerintah, karena harga amonium sulfat mahal; proses pembuatan amonium sulfat mahal, karena sebagian bahan bakunya diimport (Departemen Pertanian, 1989).

Diskusi dalam seminar bertema Sulfur Fertilizer Policy for Lowland and Upland Rice Cropping Systems in Indonesia, Jakarta, 18-20 Juli, 1989, menyimpulkan bahwa:

1) Tanaman padi responsif terhadap unsur S pada lahan tertentu (terletak jauh dari gunung berapi yang masih aktif).
2) Kalau Amonium sulfat dianjurkan, takarannya diturunkan dari 100 kg/ha menajdi 50 kg/ha.
3) Selain Amonium sulfat, dianjurkan agar TSP dan Urea dilapisi (*coating*) dengan sulfur.

Manwan dan Fagi (1989) membuktikan kesimpulan pertama. Fagi dan Makarim (1990) membuktikan bahwa SCU (*sulfur coated urea*) berpengaruh positif terhadap hasil padi sawah. Tetapi, harga pembuatan SCU 30% lebih tinggi dari pembuatan urea.

Setelah seminar ini timbul wacana bahwa pupuk Amonium sulfat dapat dikategorikan sebagai pupuk majemuk. Wacana masuk akal dan perlu dipertimbangkan berdasarkan analisis kimia pupuk (Tabel 23). Banyak pupuk N yang juga mengandung fosfat, klor, kalsium, bahkan *Single Super-phosphate* dan *Triple Super-phosphate* mengandung P, S dan Ca. Anjuran pemupukan spesifik lokasi (Badan Litbang Pertanian, 2007) dapat berupa kombinasi antara pupuk tunggal dan pupuk organik dan pupuk tunggal (SP-36) dan pupuk majemuk NPK 15-15-15, NPK 10-10-10 atau NPK 30-6-8. Tindakan ini overdosis?.

VII
MEKANISME JERAPAN HARA OLEH TANAMAN

Berat bahan kering dari jaringan tanaman dideterminasi dengan cara yang cukup akurat melalui pengeringan contoh jaringan di dalam pengering pada suhu 100 ^{0}C. Hasilnya adalah sisa jaringan bebas air. Selanjutnya adalah proses perabuan pada suhu 600 ^{0}C. Hampir semua sisa jaringan tanaman teroksidasi pada suhu yang panas tersebut. Semua elemen organik menguap. Abu yang tersisa adalah unsur kimia yang dijerap tanaman, kecuali nitrogen, karbon, hidrogen dan oksigen yang ikut menguap.

Hasil analisis kimia abu tersebut menunjukkan bahwa sekitar 40 unsur kimia yang dikandungnya; ini adalah unsur kimia yang dijerap tanaman: aluminium, arsen, barium, boron, brom, caesin, kalium, karbon, klor, krom, kobalt, tembaga, flor, hidrogen, besi, timah, litium, mangan, magnesium, merkuri, molebdin, nitrogen, oksigen, fosfor, kalium, rubidium, selenium, silika, perak, natrium, strontium, sulfur, talium, titanium, timah, vanadium, dan seng (Meyer and Anderson, 1959). Dari sekitar 40 unsur kimia itu hanya 16 unsur kimia yang merupakan hara penting bagi tanaman (Tabel 7).

Keberadaan unsur kimia yang tidak digunakan tanaman, tetapi dijerap dan berada dalam jaringan tanaman menghasilkan hipotesis tentang meknisme jerapan unsur kimia oleh tanaman.

Tanah adalah sumber hara yang dijerap tanaman; kekurangan unsur hara tersedia itu diberikan dalam bentuk pupuk (lihat uraian dalam Bab terdahulu).

Hipotensis dan Teori tentang Jerapan Hara

Salah satu hipotesis yang diacu oleh Meyer dan Anderson (1959) menyatakan bahwa unsur hara masuk ke tubuh tanaman melalui

akar dalam bentuk elektrolit atau dalam bentuk molekul atau ion. Hipotesis pertama ditolak karena elektrolit sedikit terdisosiasi pada lapisan plasma dari sitoplasma yang mengandung senyawa lipoid, sementara unsur itu menumpuk dalam jumlah banyak. Maka, hipotesis yang diterima adalah bahwa unsur hara masuk ke dalam tubuh tanaman dan tersebar melalui sel ke sel dalam bentuk ion (kation atau anion) (lihat Tabel 7).

Teori tentang jerapan hara oleh tanaman diuraikan lebih rinci dan komprehensif oleh Devlin (1975). Prosesnya tidak sesederhana seperti yang diuraikan berikut; sampai saat bukunya ditulis proses yang kompleks itu tidak sepenuhnya dapat dipecahkan.

1. Jerapan pasif

Difusi bebas

Jerapan hara terjadi melalui kontak/sentuhan langsung antara akar tanaman dengan koloid atau dengan larutan tanah. Prosesnya tidak menggunakan energi dari metabolisme dalam sel-sel tanaman.

- jerapan hara atau difusi hara dari tanah masuk ke dalam akar tidak dipengaruhi oleh suhu.
- hara yang masuk ke dalam akar dapat kembali lagi ke dalam tanah (*free diffusion*) sampai equalibrium tercapai.
- volume dari jaringan akar membesar ketika unsur hara itu masuk, kalau konsentrasi unsur hara di dalam larutan tanah bertambah; ruang di luar perakaran itu disebut *outer free space*, sedangkan ruang di dalam perakaran disebut *apparent free space*.

Mekanisme jerapan hara melalui difusi bebas tidak dominan atau kurang penting (Meyer dan Anderson, 1959).

Tukar menukar ion

Ion yang terikat pada dinding sel atau membran dari jaringan dapat bertukar dengan ion dari larutan air tanah di mana akar tanaman terbenam. Sebagai contoh adalah pertukaran antar kation K^+ dalam larutan tanah dengan ion H^+ pada membran dari sel. Anion dapat bertukar dengan ion OH^- bebas dalam larutan tanah dengan cara yang sama dengan pertukaran antar K^+ dengan H^+.

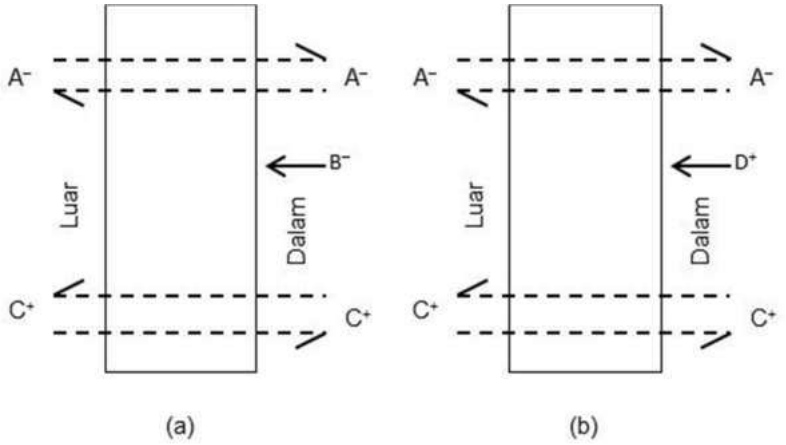
Mekanisme tukar menukar ion memfasilitasi jerapan unsur hara oleh akar lebih banyak dari pada difusi bebas.

Equilibrium Donnan

Equilibrium Donnan adalah teori bagi ion yang terikat atau tidak terdifusi (*diffusible ions*). Sebagai contoh membran yang permeabel bagi sebagian ion tetapi tidak bagi ion yang lain; sel tersebut berada dalam larutan tanah:

- di balik membran sel ada konsentrasi kation dan anion tetapi tidak dapat menembus membran untuk ke luar dari sel ke larutan tanah, karena ion itu terikat kuat.
- sebaliknya, membran sel itu permeabel terhadap kation dan anion dalam larutan tanah.
- maka, sejumlah kation dan anion dari larutan tanah akan terdifusi ke dalam sel akar sampai tercapai keseimbangan antara ion di dalam sel dengan ion dalam larutan tanah.
- keseimbangan itu juga diikuti dengan muatan positif/negatif yang seimbang.

Mekanisme eguilibrium Donnan menjelaskan pergerakan kation dan anion karena adanya gradien konsentrasi kation dan anion (Gambar 19).



Gambar 19. Difusi ion melintasi mebran sel.
Sumber: Devlin (1975)

Keterangan Gambar:

a) Membran tidak permeabel terhadap anion B^-, menyebabkan tambahan kation, C^+, maka ada akumulasi kation di dalam akar.
b) Membran tidak permeabel terhadap kation D^+, menyebabkan tambahan anion A^- (melalui difusi).

Aliran massal

Sebagian ahli percaya bahwa ion bergerak dan masuk ke dalam tubuh tanaman melalui aliran massal (*mass flow*) dari air. Transpirasi diimbangi oleh jerapan air oleh akar tanaman, dan ion yang larut di dalam larutan tanah ikut terbawa. Efek transpirasi langsung atau tidak langsung terhadap jerapan hara masih belum jelas.

Devlin (1975) setuju terhadap tori ini, tetapi tidak seluruh jerapan hara difasilitasi oleh transpirasi saja; difusi bebas, gradien konsetrasi hara dan mekanisme menurut equilibrium Donnan ikut berperan juga.

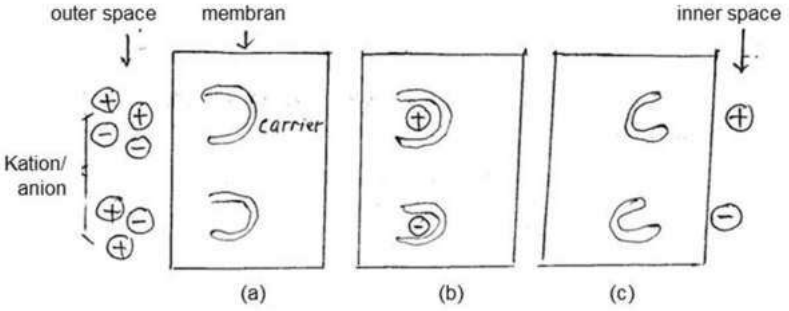
2. Jerapan aktif

Konsentrasi anion dan kation dalam cairan vakuola dari tanaman yang ditumbuhkan di kultur media terkumpul akibat dari gradien konsentrasi. Konsentrasi yang demikian banyak tidak cukup dipenuhi dari proses tukar menukar ion dan equilibrium Donnan yang bersifat mekanisme secara fisik. Selain itu, ion yang terakumulasi sangat selektif.

Konsentrasi ion itu terhambat kalau aktivitas metabolisme tanaman diganggu dengan suhu rendah, tekanan oksigen rendah, dan dengan penghambat metabolisme tanaman yang lain. Dari informasi yang diperoleh itu, Devlin (1975) menyimpulkan bahwa akumulasi itu terjadi oleh energi dari metabolism tanaman. Meyer dan Anderson (1957) menyebutkan bahwa energi itu berasal dari energi respirasi. Dengan kata lain unsur hara utama tanaman dijerap secara aktif dengan menggunakan energi dari metabolisme.

Konsep carrier

Untuk mempermudah keterangan tentang konsep *carrier*, Devlin (1975) membagi ruang dalam jaringan atau sel kemana unsur hara menembus dengan menggunakan energi metabolisme, sebagai *inner space*. Di luar dari *inner space* adalah *outer space* yang batasannya belum jelas, diperkirakan berada di tengah sitoplasma. Ruang antara *outer space* dan *inner space* tidak permeabel terhadap ion bebas. Gambar 20 mengilustrasikan bagaimana konsep *carrier* itu terjadi sehingga ion bebas dapat menembus ruang yang tidak permeabel itu. Ilustarsi penting dari teori *carrier* adalah terbentuknya kompleks *carrier-ion* yang mampu menembus membran yang tidak permeabel terhadap ion. Ion yang terkumpul di dalam *inner space* tidak dapat kembali ke *outer space* setelah terlepas dari *carrier-ion complex*.



Gambar 20. Ilustrasi proses jerapan unsur hara menembus ruang tidak permeabel yang difasilitasi oleh *carrier*: (a) membran tidak permeabel terhadap ion, (b) kompleks *carrier-ion* terbentuk, (c) ion dilepas ke dalam *inner space.*
Sumber: Devlin (1975)

Hal-hal menarik yang perlu dicatat dari penjelasan tentang teori *carrier*, adalah:

- jerapan unsur hara melalui *carrier* berlangsung singkat karena jumlah *carrier* terbatas dan cepat jenuh (kurang dari 30 menit).
- masing-masing unsur hara mempunyai *carrier* spesifik atau *carrier* tertentu untuk mengakomodasi unsur hara yang sesuai.

Namun menurut Meyer dan Anderson (1959), karena sel-sel baru terbentuk melalui pembelahan sel, sebagai indikator dari pertumbuhan tanaman, maka *carrier* terus berkembang.

Brady (1970 mengilustrasikan proses jerapan hara tanaman secara lebih jelas dan sederhana. Devlin (1975) menambahkan bahwa enzim juga berperan dalam jerapan unsur hara; keduanya *carrier* dan enzim mampu memfasilitasi dua atau lebih jenis unsur hara.

Dari 40 unsur kimia yang ditemukan dalam abu pembakaran jaringan tanaman, hanya 16 unsur yang dibutuhkan tanaman dalam metabolisme untuk pertumbuhannya. Maka dapat dipastikan bahwa 16 unsur hara itu yang dijerap dengan menggunakan energi metabolisme atau energi respirasi.

Penarikan unsur hara oleh cytochrome

Awalnya diragukan peranan respirasi dalam jerapan unsur hara oleh tanaman. Tetapi informasi atau data lebih baru menyatakan bahwa peranan respirasi itu ada yang diistilahkan sebagai *anion-salt-respiration* (Lundegardh and Burstrom, 1933, dalam Devlin, 1975) Teori tantang *anion – salt respiration* berdasarkan asumsi sebagai berikut:

1) Jerapan anion tidak tergantung pada jerapan kation, melainkan melalui mekanisme yang berbeda.
2) Gradien konsentrasi oksigen terjadi antara *outer sulface* dengan *inner surface* dari membran (Gambar 20) yang menyebabkan kondisi oksidasi di *outer surface* dan reduksi di *inner surface*.
3) Gerakan nyata anion dari *outer surface* ke *inner surface* terjadi melalui sistem *cytochrome oxidase* itu diduga sebagai *carrier*.

Teori penarikan unsur hara oleh cytochrome disebut *cytocrome pump* memberi gambaran yang jelas tentang peran dari energi metabolisme, tetapi belum diterima secara internasional, bahkan mengundang banyak kritik, berdasarkan fakta, bahwa:

∇ pencegah phosphorilasi yang bersifat oksidatif, meningkatkan respirasi, tetapi menurunkan jerapan unsur hara,

∇ teori ini menganggap hanya anion yang berperan dalam respirasi, seperti kalium dan natrium juga menstimulasi respirasi (Roberston *et. al*. 1951; Hardley and Overstreet, 1955, dalam Devlin, 1975).

Faktor yang Berpengaruh Terhadap Jerapan Hara

Dari uraian bahwa unsur hara dijerap oleh tanaman secara pasif dan aktif, dapat diduga bahwa lingkungan tubuh berpengaruh terhadap jerapan unsur hara. Faktor lingkungan itu adalah suhu, pH tanah, tekanan oksigen, interaksi antara unsur hara, dan pertumbuhan.

1. Suhu

Pengaruh suhu terjadi pada kisaran yang sempit. Makin tinggi sampai batas tertinggi, makin naik absorpsi unsur hara; lebih dari itu jerapan hara akan turun (> 40^0C). Suhu rendah menghambat proses biokimia dan berakibat pada menurunnya jerapan unsur hara.

2. Konsentrasi ion hidrogen

Ketersediaan unsur hara dalam larutan tanah sangat dipengaruhi oleh pH. Sebagai contoh H_2PO_4 (ion fosfat monovalen) adalah ion fosfor yang siap dijerap oleh tanaman.

- pH rendah: jerapan H_2PO_4 akan tinggi
- pH mendekati alkalis (PH sedang-tinggi): terbentuk HPO_4^{2-} (bivalen fosfat) yang jerapannya sedang.
- pH tinggi (alkalis): PO_4^{3-} (ion fosfat trivalen) tidak tersedia bagi tanaman.

3. Cahaya matahari

Cahaya matahari berpengaruh terhadap pembukaan/penutupan mulut daun (stomata), dan sebagai konsekuensinya berpengaruh terhadap fotosintesis dan secara tidak langsung terhadap jerapan unsur hara.

- energi dari fotosintesis akan berpengaruh terhadap jerapan unsur hara.
- transpirasi yang besar juga berpengaruh terhadap jerapan unsur hara (*mass flow*).

4. Tekanan oksigen

Jerapan unsur hara secara aktif akan terhambat kalau tekanan oksigen sangat rendah, apalagi nihil. Makin tinggi tekanan oksigen makin tinggi jerapan fosfor sampai batas maksimal 1,8%; lebih dari itu jerapan hara stagnasi/melandai.

5. Interaksi antara unsur hara

Telah dimaklumi bahwa jerapan satu ion oleh tanaman ditentukan oleh ion yang lain. Dalam hal kation, ini disebut *complimentary cation*. Sebagai contoh:

- jerapan kalsium, magnesium dan bromium terhambat karena tidak adanya kalsium; makin tinggi ketersediaan kalsium makin tinggi jerapan kalsium, bromium dan magnesium sampai tingkat ketersediaan kalsium mencapai titik maksimum.
- interaksi antara ion berkenaan dengan ketersediaan titik-titik adsorpsi pada *carriers*.

6. Pertumbuhan tanaman

Dalam jangka panjang jerapan unsur hara adalah kelanjutan jerapan unsur hara dalam jangka pendek, seperti hipotesis atau teori yang diuraikan di muka, khususnya jerapan aktif dari unsur hara.

Pertumbuhan jaringan tanaman atau keseluruhan tubuh tanaman memperbesar luas area, jumlah sel dan sintesis dari *carrier-carrier* baru, sehingga memperbanyak jumlah jerapan hara sesuai dengan laju pertumbuhan. Peningkatan volume air yang dijerap bersama dengan peningkatan transpirasi memperbanyak jerapan melalui *mass flow* dan difusi.

Pertumbuhan tanaman terbagi menjadi fase-fase pertumbuhan dan setiap fase terbagi lagi menjadi stadia-stadia pertumbuhan. Tiap-tiap stadia memerlukan jumlah dan jenis usur hara prioritas tertentu. Teknologi memodifikasi dan membagi total unsur hara menjadi porsi takaran untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi penggunaan unsur hara.

Fungsi dari Unsur Hara Bagi Pertumbuhan Tanaman

Fungsi dari masing-masing unsur hara penting bagi tanaman (16 unsur hara *essential* dalam Tabel 7) menarik perhatian dan dibahas

oleh ahli tanah Brady (1974) dan Tisdale dan Nelson (1975), dan oleh ahli fisiologi tanaman Meyer dan Anderson (1959), Salisburg dan Ross (1969), dan Devlin (1975). Kedalaman dari uraian mereka tergantung isi pokok dari buku yang ditulisnya.

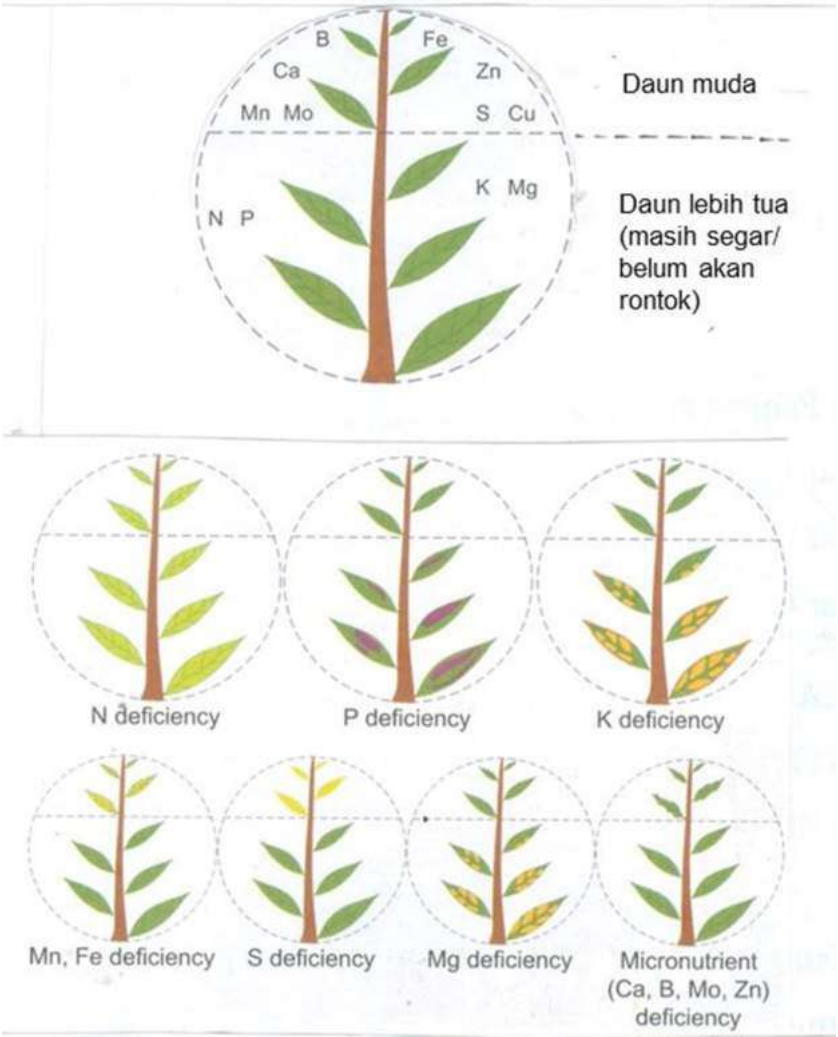
Penulis menguraikan dari sari uraian masing-masing ahli tersebut dari buku yang ditulisnya. Pentingnya unsur hara tersebut bagi tanaman akan lebih diapresiasi dengan melihat tanda-tanda pada daun akibat dari kekurangan atau kahat atau defisiensi unsur hara termaksud. Daun berisi penuh dengan hijauan tanaman (krorofil) yang aktif berproses fotosintesis. Kehilangan sebagai atau seluruh klorofil akan berdampak negatif terhadap proses fotosintesis dan konsekuensinya. Canpotex dan IPNI menunjukkan bagian dari untaian daun dimana tanda-tanda defisiensi itu dapat diamati (Tabel 30).

Tabel 30. Tanda-tanda dari defisiensi unsur hara pada bagian untaian daun.

Unsur hara	Posisi pada untaian daun	Klorosis	Nekrosis batas daun	Warna dan bentuk daun
N	Semua daun	Ya	Tidak	Daun menguning semua
P	Daun lebih tua	Tidak	Tidak	Jingga terpencar
K	Daun lebih tua	Ya	Ya	Kuning terpencar
Mg	Daun lebih tua	Ya	Tidak	Kuning terpencar
Ca	Daun muda	Ya	Tidak	Bentuk daun berubah
S	Daun muda	Ya	Tidak	Daun muda menguning
Mn, Fe	Daun muda	Ya	Tidak	Kuning antar urat daun
B, Zn, Cu, Ca, Mo	Daun muda	-	-	Bentuk daun berubah

Sumber: Canpotex dan IPNI (2009)

Tanda-tanda defisiensi unsur hara utama (Tabel 26) didemontrasikan dalam Gambar 21.



Gambar 21. Ilustrasi dari tanda-tanda kekurangan kahat atau defisiensi unsur hara pada bagian-bagian dari untaian daun.
Sumber: Canpotex dan IPNI (2009)

1. Nitrogen

- Struktur dari molekul protein ~ purin, pirimidin, porphirin dan koensim; purin dan pirimidin adalah komponen dari asam nukleat RNA dan DNA yang penting dalam sintesis protein, sedangkan porphirin adalah senyawa pembentuk klorofil dan enzim sitochrome penting dalam fotosintesis dan respirasi.
- Sedemikian pentingnya nitrogen sehingga mendapat perhatian khusus dalam praktek pertanian.
- Tanda-tanda defisiensi lihat Gambar 21; daun berwarna kekuningan (*chlorosis*) karena kandungan klorofil berkurang; sebagai gantinya yang terbentuk pigmen, bukan klorofil.

2. Fosfor

- Penyusun (*constituent*) dari asam nukleat, fosfolipit, koenzim NAD dan NADP; NAD dan NADP penting dalam reaksi oksidatif-reduktif dalam transfer hidrogen ion pada fotosintesis, respirasi, glikolisis dan sintensis asam lemak.
- Konsetrasi fosfat yang tinggi terdapat pada jaringan meristem dari bagian tanaman yang sedang tumbuh (titik tumbuh tanaman). Juga, terlibat dalam sistesis *nucleo protein*; melalui ATP fosfor memfasilitasi aktivitas dari asam amino.
- Diduga bahwa fosfolipid dan protein adalah pembentuk dari membran sel.
- Tanda-tanda defisiensi lihat Gambar 21; sebagai tambahan calon daun gugur, dan daun yang telah terbentuk berwarna *purple*, dan ada titik-titik mati (*necrotic*) pada helai daun.

3. Kalium

- Fungsi khusus dari kalium belum terungkap tetapi dapat diduga dari pengaruh defisiensinya yang menghambat fotosintesis, respirasi, pembentukan klorofil dan kandungan

air di dalam daun; konsentrasi yang tinggi dijumpai pada jaringan maristim dari bagian tanaman yang sedang tumbuh.

- Tanda-tanda defisiensi lihat Gambar 21; mula-mula timbul klorosis (warna kekuningan), diikuti oleh nekrotik pada ujung dan pinggiran dari daun.

4. Kalsium

- Sebagai penyusun lamella tengah dari dinding sel dalam bentuk kalsium pektat; berkurangnya sebagian kandungan kalsium pada lamella tengah meningkatkan plastisitas dan permeabilitas dari sel; juga penting dalam pembentukan membran sel dan struktur lipid, dan pembelahan sel secara normal.
- Tanda-tanda defisiensi dapat dilihat dalam Gambar 21; selain itu jaringan meristem akan mati, akar memendek, menebal dan berwarna kecoklatan, daun muda berwarna kekuningan dan menderita nekrosis.

5. Magnesium

- Penyusunan dari molekul klorofil maka menentukan proses fotosintesis dan metabolisme karbon dalam bentuk enzim; bersama kalsium berfungsi sebagai aktivator dari metabolisme karbon yang juga melibatkan ATP dalam reaksinya, dan aktivator dari enzim, dalam sintesis asam nukleat (DNA, RNA).
- Dua fungsinya dalam sintesis protein, adalah (a) aktivator dari beberapa sistem enzim yang terlibat dalam asam nukleat, dan (b) pemersatu (*binding agent*) pada partikel mikrosom dimana berlangsung sintesis protein.
- Tanda-tanda defisiensi dapat dilihat dalam Gambar 21. Warna kekuningan antara tulang daun. Warna kekuning muulai terlihat dari daun bawah, kemudian berlanjut kepada daun yang lebih muda kalau defisiensi makin parah.

6. Sulfur

- Penyusun struktur protein dalam bentuk asam amino yang mengandung sulfur sistin (*cystine*), sistein ↔ dan metionin (*methionine*).
- Sulfur dijerap oleh tanaman dalam bentuk ion SO_4^{2-}, kemudian direduksi oleh senyawa 3-phosphoadenosine 5-phosphosulfate (PAPS) dan ATP. PAPS disintesis melalui 2 langkah:

$$SO_4^{2-} + ATP \xrightarrow[Mg^{2+}]{\text{sulfurilase}} APS + P\text{-}P$$

$$APS + ATP \xrightarrow[Mg^{2+}]{\text{kinase}} PAPS + ADP$$

  Sulfat aktif selanjutnya direduksi dan masuk ke dalam struktur cystine, cystein dan methionine menjadi struktur protein.
- Tanda-tanda defisiensi dapat dilihat dalam Gambar 21, klorosis mulai tampak pada daun muda, kemudian berlanjut ke seluruh daun kalau defisiensi berlanjut dan semakin parah.

7. Besi

- Sering dijerap oleh tanaman dalam bentuk ion ferri (Fe^{3+}), tetapi yang aktif dalam metabolisme adalah dalam bentuk ferro (Fe^{2+}); ion ferro diyakini penting dalam sintesis protein klorofil, lebih tepatnya dalam sintesis protein klorofil sintesis ini diintermediasi oleh *protoporphyrin*-9, yang juga berperan dalam sintesis *cytochrome*. Juga, diidentifikasi sebagai komponen dari bermacam-macam *flavoprotein* dan *iron flavoproteins*.
- Tanda-tanda defisiensi hara besi dapat dilihat dalam Gambar 21. Klorosis terjadi pada daun yang lebih muda dari pada daun tua. Hal ini terjadi karena ion ferro tidak mobil dalam

tanaman. Kekahatan hara besi menghambat pembentukan kloroplas melalui hambatan terhadap sintesis protein.

8. Mangan

- Faktor penting dalam respirasi dan metabolisme nitrogen berupa aktivator dari enzim dalam sirkulasi Krebs (*Krebs cycle*), seperti *melic dehydrogenase*, dan *exalosuccinic decarboxylase, nitris reductase* dan *hydroxylamine reductase*.
- Ion Mn juga ditengarai terlibat dalam oksidasi dari *indole-3-acetic acid* (IAA), suatu *auxin* alami dari tanaman.
- Tanda-tanda defisiensi unsur hara mangan dapat dilihat dalam Gambar 21. Titik-titik klorofil dan nekrotik dijumpai pada bagian daun antara tulang daun muda atau daun tua.

9. Tembaga

- Tembaga (Cu) adalah komponen dari *phenolases*, *laccases* dan asam *ascorbic oxidase* yang berfungsi dalam fotosintesis. Kloroplas terdiri atas protein yang mengandung Cu, disebut *plastocyanin*; kekahatan/defisiensi Cu menyebabkan jerapan CO_2 oleh daun terhambat atau menurun.
- Defisiensi Cu menyebabkan tanaman buah-buahan mudah terserang penyakit yang disebut *axanthema*. Kasus *reclamation* pada tanaman serealia dan leguminosa terjadi kalau kahat Cu; juga terjadi nekrosis pada ujung daun muda yang berlanjut pada pinggiran daun sehingga tampak memutih.

10. Seng

- Seng (Zn) terlibat dalam biosintesis *auxin* atau (*indole-3- acetic acid* (IAA) tanaman, dan protein. Kandungan *tryptophan* berkolerasi positif dengan kandungan IAA tanaman kalau defisiensi Zn, sebaliknya kalau Zn diberikan pada tanaman yang kahat Zn; maka disimpulkan bahwa Zn terlibat dalam sintesis *tryptophan*, sebagai katalisator dari sintesis IAA.

- Zn juga berfungsi sebagai katalis dari dekomposisi asam karbonat (H_2CO_3) menjadi CO_2 dan H_2O. Enzim lain yang perlu keberadaan Zn adalah *alcohol dehydrogenase* dan *pyridine nucleptide dehydrogenase*; selain itu Zn berfungsi dalam mobilitas enzim pengangkat fosfor.
- Defisiensi Zn selain menurunkan kandungan IAA, juga menyebabkan akumulasi senyawa nitrogen yang larut dalam air seperti asam amino dan amida.
- Tanda-tanda defisinsi Zn adalah klorosis antara tulang daun dari daun tua, diikuti oleh nekrotik keputihan, ukuran daun menyempit dan melintir yang menumpuk pada cabang-cabang pendek yang disebut *rosette;* defisinsi Zn yang parah menurunkan produksi biji kacang-kacangan (*beans* dan *peas*), dan menghambat perkembangan buah jeruk.

11. Boron

- Ion Boron (BO_3^{3-}) terlbat dalam transportasi karbohidrat; ion BO_3^{3-} membentuk kompleks dengan senyawa polyhidroxy seperti gula. Gula lebih mudah diangkut dan menembus membran sel dalam bentuk kompleks borat tersebut. Pendapat lain menyatakan bahwa ion BO_3^{3-} berasosiasi dengan membran sel dalam bentuk kompleks dengan molekul gula sebab itu mempermudah lintasan melewati membran sel.
- Berdasarkan fakta di atas ada pendapat bahwa defisiensi boron sebenarnya ujud dari defisiensi gula yang menyebabkan kematian batang dan ujung akar, keguguran bunga, terutama pada titik tumbuh.
- Fasilitasi transportasi gula oleh ion BO_3^{3-} berimplikasi terhadap deferinsiasi dan pertumbuhan sel, metabolism nitrogen, fosfor dan lemak, jerapan hara dalam bentuk senyawa garam, jerapan air, metabolism hormon dan fostosintesis.

- Tanda-tanda dari defisinsi boron adalah kematian ujung tunas dan pertumbuhan tunas terhambat ; daun menebal kadang mengerinting, pembungaan terhambat, akar memendek

12. Molibdin

- Ion molibdin (MO_4^{2-}) berimplikasi pada fiksasi gas nitrogen (N_2) dan asimilasi nitrat (NO_3^-); defisiensi ion MO_4^{2-} cenderung menurunkan konsentrasi asam askorbit (*ascorbic acid*) dalam tanaman. Jadi, ion MO_4^{2-} melindungi *ascorbic acid*, selain terlibat dalam metabolisme fosfor.
- Defisiensi MO_4^{2-} tampak berupa klorosis pada bagian daun antara tulang daun di bagian batang terbawah, disusul oleh nekrosis dan penggulungan daun; defisiensi parah membuat daun layu, pembuangaan terhambat, dan gagal menghasilkan buah. Penyakit *whip-tail* (ujung cambuk) pada daun juga disebabkan oleh defisiensi MO_4^2.

Sintesis

Jenis unsur hara penting tambahan

Antara ahli ilmu tanah dan ahli fisiologi (fisiologis) tanaman yang sepakat tentang jumlah dan jenis unsur hara penting bagi tanaman ialah (Brady, 1974), Tisdale dan Nelson (1975), dan Salisbury dan Ross (1969). Enam belas jenis unsur hara penting ditabulasi (Tabel 7). Tisdale dan Nelson (1975) menambah pembahasan unsur klor (chlorin), Selenium dan Sodium atau Natrium dari sisi bahayanya bagi tanaman/ternak kalau konsentrasinya berlebihan.

Devlin (1975) hanya membahas fungsi penting dan tanda-tanda defisiensinya dari 12 unsur hara, yang berasal dari tanah; jumlah unsur hara penting itu di tambah yang dijerap dari udara dan air adalah 15. Meyer dan Anderson (1959) mereview hasil penelitian bahwa Sodium dan Natrium (Na^+), Klor atau Chlorin (Cl^-) dan Selenium (Se) juga penting, seperti berikut:

13. Natrium

- Fungsi natrium (Na+) belum jelas, tetapi analisis kimia dari abu jaringan tanaman kadang-kadang diperoleh Na dalam jumlah yang cukup banyak.
- Beberapa spesies tanaman tumbuh normal pada lokasi dimana kandungan kalium atau potassium (K^+) sangat rendah, seperti *barley*, *carrot* (wortel), *cotton* (kapas) dan *tomato* (tomat).

14. Silika

- Silika atau silikon (Si) paling banyak dijumpai dari analisis kimia abu, terutama bagi tanaman yang berada di atas tanah, seperti rerumputan; sebab itu ada yang percaya bahwa Si adalah unsur penting juga bagi tanaman. Pendapat itu dibantah karena jenis tanaman yang sama tumbuh baik pada media yang tidak mengandung Si.
- Fungsi Si yang dianggap dapat memperkuat/memperkokoh jerami atau batang tanaman serealia juga tidak terbukti.
- Walaupun pengembangannya belum jelas, tetapi diduga membantu metabolisme fosfor dari tanaman; fungsi tidak langsung dari Si adalah memperkuat ketahanan tanaman terhadap cendawan dan insekta.

15. Klor

- Klor atau *chlorine* (Cl^-) sebelumnya dianggap sebagai unsur hara penting, tetapi kemudian dibantah, karena variabilitas dampaknya bersifat ekstrem ~ berhasil atau gagal pada spesies tanaman yang berbeda.
- Pemberian klor sebagai pupuk hanya berpengaruh terhadap interaksinya dengan unsur lain di dalam tanah, bukan pengaruhnya terhadap metabolisme dalam tanaman.
- Tanaman pada lahan pantai (rawa pantai) dapat beradaptasi dengan kondisi yang konsentrasi NaCl-nya sangat tinggi.

- Asparagus adalah contoh yang spesifik; tanaman ini perlu perlakuan dengan NaCl agar tumbuh dengan baik.

16. Selenium

- Selenium dengan konsentrasi tinggi dan terjerap oleh tanaman pakan dapat meracuni ternak disebut penyakit alkalis atau *alkali disease*.
- Spesies tanaman tertentu dapat tumbuh pada tanah dengan kandungan selenium tinggi.

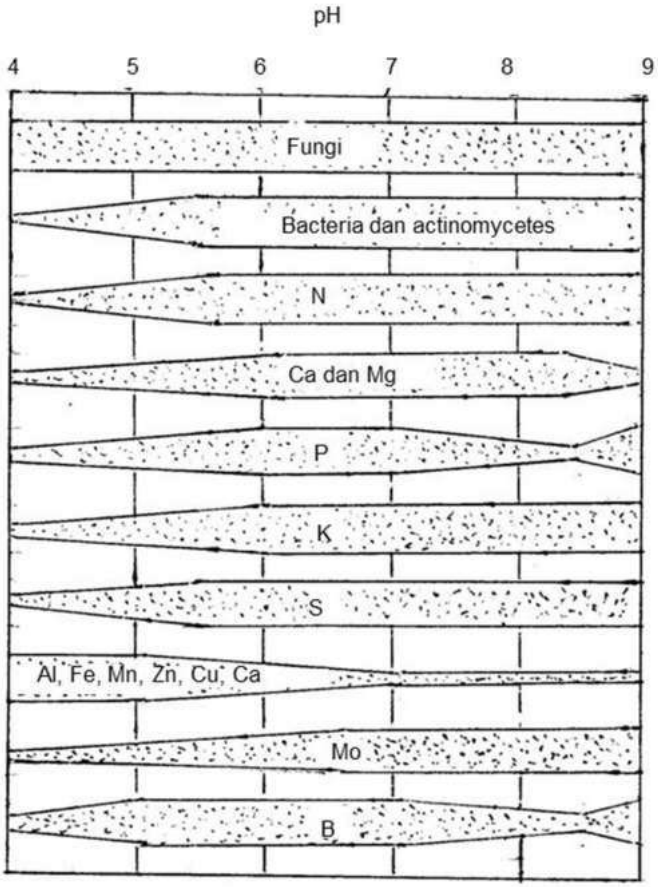
Dari sudut biologi semua unsur hara yang menunjang pertumbuhan semua spesies tanaman adalah penting. Tapi, pupuk yang mengandung unsur yang diperlukan tanaman yang tidak bernilai ekonomis tidak menarik perhatian para pakar ilmu tanah dan ilmu biologi-taksomoni.

Penulis mengikuti dan mendukung para pakar yang perhatiannya tertuju kepada spesies tanaman yang penting secara sosial dan ekonomi. Jadi, penulis setuju hanya 16 unsur hara yang penting bagi tanaman.

pH tanah dan ketersediaan hara bagi tanaman

Jenis pupuk pada tanah mineral adalah yang mengandung unsur hara makro; pupuk yang mengandung unsur hara mikro hanya yang mengandung boron, klor dan tembaga. Pupuk yang mengandung unsur hara mikro lainnya belum tersedia di pasar. Mengapa ?

Brady (1974) mengilustrasikan ketersedian unsur hara pada berbagai pH tanah (Gambar 22).



Gambar 22. Pengaruh pH tanah terhadap aktivitas mikroorganisme tanah dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman
Catatan: makin lebar pita makin besar ketersediaan hara:
Sumber: Brady (1974)

Ketersediaan unsur hara mikro rendah pada pH netral sampai alkalis, tetapi karena kebutuhan tanaman sangat sedikit maka kandungannya telah cukup memenuhi kebutuhan tanaman. Keracunan unsur hara mikro (Al, Fe, Mn) dapat terjadi pada tanah masam, tetapi defisinsi Zn dan Cu dapat terjadi pada tanah basa (alkalis).

Perhitungan keuntungan dari pemupukan yang efektif dan efisien

Dalam bab-bab sebelumnya penulis menyajikan kiat-kiat untuk menerapkan teknik pemupukan yang efektif dan efisien. Pembacalah yang menetapkan alternatif teknologniya untuk diimplementasikan di lahan petani.

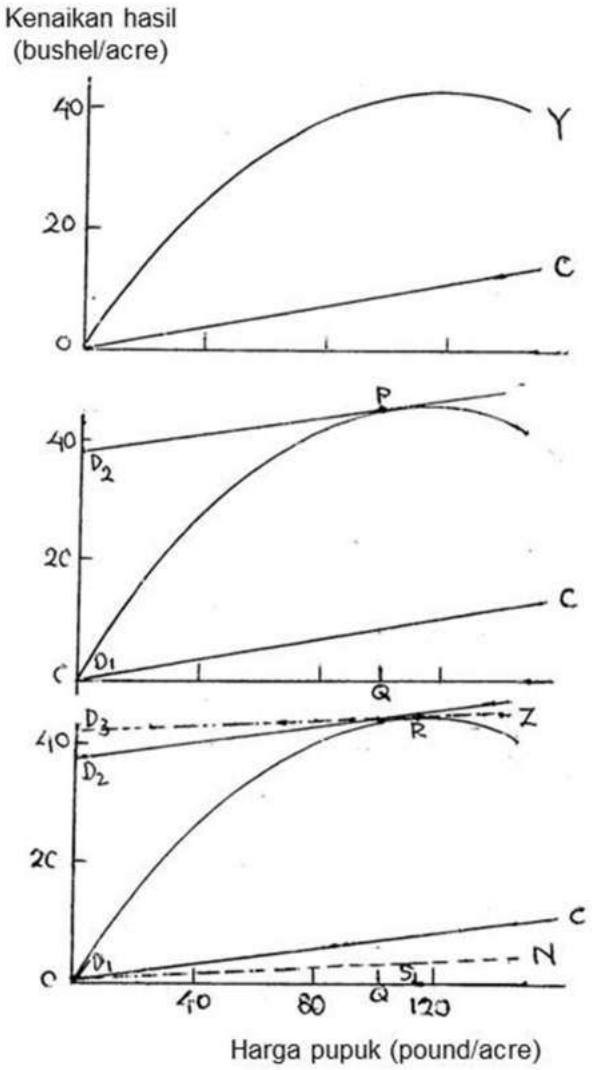
Perhatian terhadap efektivitas dan efisiensi pemupukan harus direncanakan secara komprehensif karena efektivitas dan efisiensi ditentukan oleh komponen teknologi yang lain (lihat Gambar 4 dan 5). Dengan asumsi bahwa komponen teknologi telah diberikan secara optimal, keuntungan dari pemupukan diilustrasikan dalam Gambar 23. Langkah-langkah untuk menetapkan keuntungan dengan cara yang sederhana berdasarkan Gambar 23, adalah:

∇ Langkah 1

- Gambar kurva kenaikan hasil, Y (kurva kuadratik).
- Gambar kurva kenaikan harga pupuk karena pertambahan takaran, C (kurva linier).

∇ Langkah ke 2

- Geser kurva harga pupuk ke atas (arah sumbu Y) sampai menyinggung kurva Y di titik P dan memotong sumbu Y di titik D_2; garis D_2 P sejajar dengan garis D_1C.
- Dari titik P tarik garis sejajar dengan sumbu Y sampai memotong sumbu X di titik Q; titik Q adalah takaran pupuk optimum.



Gambar 23. Contoh perhitungan estimasi keuntungan dari pemupukan berkaitan dengan kenaikan hasil dan harga dari pupuk berdasarkan takaran pupuk.
Sumber: Tisdale dan Nelson (1975)

Catatan: 1 ton/ha = 0,063 x bushel/acre
ha = 0,247 11 acre

Suatu saat harga komoditas pertanian (dalam Gambar 23 adalah jagung), bisa naik karena kebutuhan pasar meningkat dan kualitas hasilnya baik. Nilai harga pupuk menjadi lebih rendah secara relatif dibanding dengan harga komoditas yang naik itu. Perkiraan keuntungannya:

∇ Langkah 3

- Buat kurva kenaikan harga pupuk yang baru, garis D_1N (kurva atau garis D_1N di bawah garis DC)
- Geser garis D_1N menjadi garis D_3Z (garis D_3Z sejajar dengan garis D_1N) sampai menyinggung kurva Y di titik R.
- Dari titik R tarik garis sejajar dengan sumbu Y sampai memotong sumbu X di titik S; titik S ini adalah takaran pupuk yang sesuai dengan kenaikan harga komoditas.

Contoh Perhitungan keuntungan dari pemupukan ini melengkapi dari contoh perhitungan yang disampaikan oleh Novizan (2007).

Prinsip dalam reaksi fisiko-kimia pada tanaman berbasis pH

pH sangat ditentukan oleh sifat dari larutan air (*aqueus solution*) dan sifat dari senyawa atau substansi yang terlarut: asam atau basa.

- Asam: sifat senyawa yang bermuatan atau tidak bermuatan, tetapi dapat melepas ion hidrogen (H^+) atau proton di dalam larutan air; contoh senyawa asam adalah ion ammonia (NH_4^+), asam asetat (CH_3COOH), ion bisulfat (HSO_4^-).
- Basa: sifat senyawa yang dapat mengikat proton dan melepaskannya di dalam larutan air; contoh ammonia (NH_3), ion asam asetat (CH_3COO^-) dan ion sulfat (SO_4^{2-}).

Elektrolit (larutan yang dapat menghasilkan atau menghantarkan arus listrik) yang kuat terionisasi utuh dalam larutan air; ini termasuk semua senyawa garam netral (garam adalah senyawa yang mengandung metal), seperti NaCl, Na_2SO_4,

KBr, dsb, dan asam kuat seperti HCl, HNO_3 dan alkali kuat NaOH, KOH, dsb. Dalam elektrolit yang lemah hanya sebagian yang terionisasi dalam larutan air, sehingga larutan tersebut mengandung campuran, yaitu bagian dari senyawa yang tidak terionisasi dan ion hasil ionisasi.

Umumnya senyawa asam dalam larutan air dari tubuh tanaman membentuk elektrolit lemah analisis atau pengukuran konsentrasi H^+ di dalamnya tidak menunjukkan konsentrasi H^+ yang sebenarnya. Sisa senyawa asam yang tidak terdisosiasi merupakan simpanan (*reservoir*) ion H. Kalau larutan itu dititrasi ion H terdisosiasi dan H^+ terbebas. Maka, titrasi memberi gambaran tentang total kemasaman. Jadi, ada istilah kemasaman aktual dan kemasaman oleh titrasi. Elektrolit lemah berfungsi sebagai penstabil pH (buffer) dari tubuh tanaman (sekitar pH 7). Pada larutan asam kuat dan terdisosiasi, asam aktual dan asam titrasi konsentrasinya relatif sama.

BOH yang tergolong alkali kuat, dalam elektrolit kuat terdisosiasi. Dengan rumus:

$$BOH \longrightarrow B^+ + OH^-$$

mass-law konstanta ionisasi atau disosiasinya (K) dihitung dengan rumus:

$$K = \frac{[B^+]\,[OH^-]}{BOH}$$

Air, sebagai pelarut (solvent), terdisosiasi menjadi ion hidrogen (H^+) dan hidroksil (OH^-); rumus disosiasi dari air:

$$K = \frac{[H^+]\,[OH^-]}{[H_2O]}$$

$$Ka = [H^+]\,[OH^-]$$

Ka adalah konsentrasi ion H^+ dan OH^- yang dihasilkan dari disosiasi air yang besarnya 10^{-14} pada 25°C. Kalau semua sisi dari persamaan dilogaritmakan, maka:

$$\log Ka = \log [H^+] + \log [OH^-]$$

Dengan mengalikan –1 pada kedua sisi dari persamaan menjadi:

$$-\log Ka = -\log [H^+] - \log [OH^-]$$

– log [H+] adalah pH dan – log Ka = pKa, maka rumus menjadi:

$$pKa = pH + pOH$$

$$pH = pKa - pOH$$

pKa = 14, pOH dapat dianalisis, sehingga nilai pH dapat dihitung. Pada larutan yang netral pH = 7; karena pKa = 14, maka pOH = 7 atau $[H^+] = 10^{-7}$ M = $[OH^-]$

Protein menduduki posisi sentral dalam arkhitekstur dan kehidupan (*functioning*) mahluk hidup. Aktivitas fisik dan kimia yang mengatur kehidupan dari sel-sel dikatarisasi oleh enzim yang semua konstituennya adalah protein. Setiap mikromolekul dari asam amino (20 asam amino), yang tersambung satu sama lain dengan ikatan peptide yang lemah. Struktur 3 dimensi dari protein dengan ikatan antar asam amino yang lemah, membuat konfigurasi asam amino dalam protein gampang berubah. Perubahan itu dipengaruhi oleh pH, cahaya, suhu dan pelarut organik (White *et al*., 1975).

Perubahan konfigurasi asam amino disebut rotasi yang berdampak positif atau negatif bergantung pada tipe konfigurasinya. Sebab itu teknik budidaya tanaman harus ditata sedemikian rupa agar konfigurasi asam amino dalam protein selalu stabil dan kondusif, antara lain dengan mengatur pH.

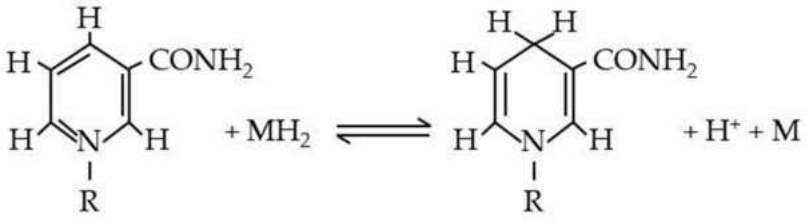
Konsep "carrier" pada jerapan hara oleh akar tanaman

Devlin (1975) tidak menguraikan senyawa dari "carrier" yang memfasilitasi jerapan aktif unsur hara tanah oleh akar tanaman

(Gambar 19). White *et al.* (1975) dalam Bab XVI dari bukunya yang membahas topik berjudul *Biological Oxidation III: Oxidative Enzimes, Coenzymer and Carriers*. Ringkasan dari penjelasan White *et al*. (1975) adalah sebagai berikut:

Koenzime yang paling berperan dalam reaksi oksidatif dalam tubuh tanaman adalah NAD (*Nicotinamine Adenine Dinucleotide*). Karena peran NAD yang efektif, maka penggunaan energi dalam reaksi oksidatif itu lebih efisien. Reaksi oksidatif dalam larutan air juga dikatalisasi oleh metal, seperti Cu^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Zn^{2+}, Mo^{+} dan sebagainya dalam bentuk senyawa yang kompleks. Karena jenis metal yang reaktif di dalam tanaman tidak tersedia dalam konsentrasi yang cukup, maka metal tersebut dijerap dari dalam tanah. Interaksi antara sel-sel akar tanaman dan koloid tanah terjadi pada interface antara akar dan tanah (Gambar 19 dan 20). Metal-metal atau unsur hara yang berperan dalam sistem kehidupan dijumpai dalam bentuk protein-metal (metalloprotein). Protein adalah elemen dari enzim dan koenzim.

Koenzim respirasi dalam bentuk teroksidasi adalah NAD, sedangkan NADP (*Nicotinamine Adenine Dinucleotide Phosphate*) dalam bentuk NAD tereduksi. NADP adalah koenzim yang mentransformasi glucose-6-phosphate menjadi 6-phospho-gluconolactone. Trasformasi NAD^{+} (teroksidasi) menjadi NADH (NAD) tereduksi) pada lingkaran nucleotide (pyridine nucleotide) terjadi karena keberadaan metal pembawa hidrogen yang rekasinya berlangsung seperti berikut:



NAD^{+} NADH

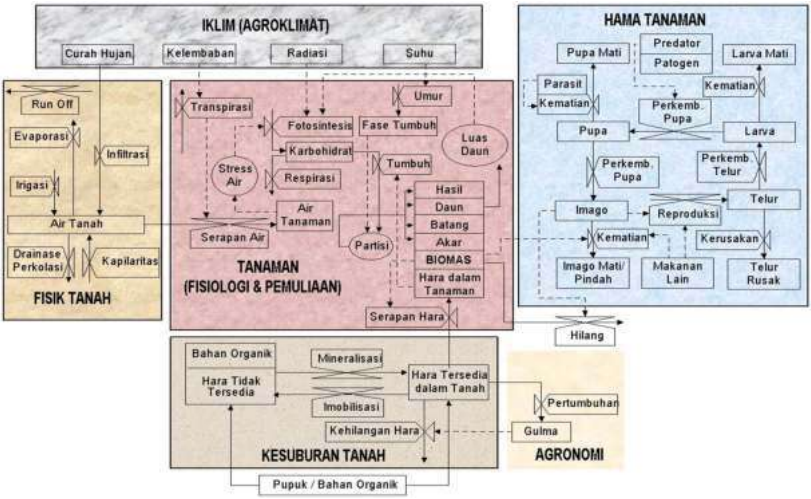
Penulis memperkirakan bahwa MH_2 berada di perbatasan antara tanah dan membran akar tanaman, tetapi tidak dapat menembus membran tersebut. Karena tanaman memerlukan metal dalam bentuk MH_2, reaksi tersebut terjadi. Inilah yang disebut jerapan hara secara aktif.

Persamaan ini barangkali mencerahkan bahwa enzim atau koenzimlah yang berfungsi sebagai "carrier".

VIII
MODEL HUBUNGAN TANAH DAN TANAMAN

Pertumbuhan tanaman yang baik akan memberi hasil optimal kalau dikelola secara tepat, dengan memperhatikan interaksi antara faktor tanaman (genetik dan fisiologik) dan faktor lingkungan abiotik (tanah, iklim, air) dan biotik (organisme panggangu tanaman). Hubungan antara tanaman dan lingkungan tersebut harus dirancang dengan memperhatikan faktor-faktor pembatasnya (*limiting factor*). Bab-bab terdahulu menguraikan faktor-faktor pembatas dan pendukungnya secara komprehensif.

Hubungan antara tanah-tanaman-iklim dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman telah dipelajari dengan menggunakan analisis sistem dan pemodelan melalui Riset Unggulan Terpadu (RUT) yang didanai oleh Kementerian Riset dan Teknologi (Makarim, 1996). Berbagai faktor baik internal maupun eksternal digambarkan keterkaitannya berupa diagram alir seperti pada Gambar 24.



Gambar 24. Diagram alir keterkaitan berbagai faktor internal tanaman dan faktor eksternal yang menentukan pertumbuhan dan hasil tanaman padi.
Sumber: Makarim (1996; 2003).

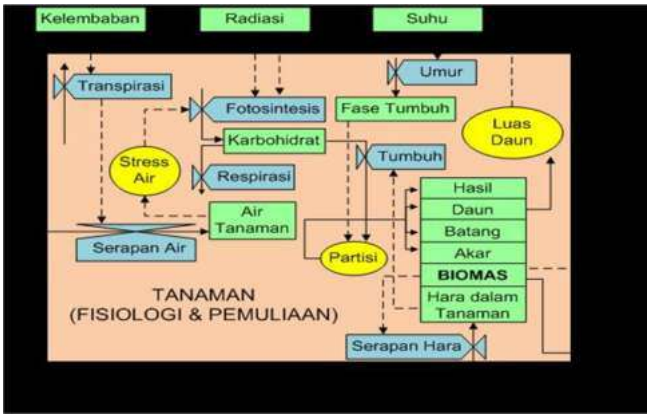
Kondisi masing-masing komponen/sistem tersebut berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman dalam tingkatan yang berbeda. Data dan informasi tentang karakteristik dari setiap komponen/sistem itu, diketahui dengan menggunakan model simulasi seperti L1D (de Vries *et al*. 1989) atau SIPADI (Makarim 2008), maka dapat diduga beberapa hal penting, yaitu:

(1) Potensi hasil berbagai jenis/varietas tanaman pada berbagai lingkungan (tanah dan musim);
(2) Penentuan tanggal tanam yang tepat;
(3) Pendugaan hasil pada kondisi iklim yang berubah;
(4) Serangan hama dan penyakit tanaman
(5) Perancangan tipe tanaman yang ideal (hasil tinggi).
(6) Pendugaan tanggap tanaman terhadap lingkungan (biotik dan abiotik) dan pemberian input secara spesifik lokasi dan musim; dsb.

Hasil potensial adalah sasaran yang ingin dicapai dalam program intensifikasi pertanian. Untuk memperoleh hasil potensial itu faktor-faktor pendukung diuraikan dalam pemodelan.

Hasil Potensial

Beberapa komponen utama dan proses yang mempengaruhinya ditunjukkan dalam Gambar 25. Potensi hasil tanaman adalah tingkat hasil tanaman maksimum pada lingkungan tumbuh yang sangat sesuai (tanah subur, radiasi surya cukup dan suhu nyaman) pada musim tanam yang tepat dan tidak ada faktor pembatas pertumbuhan tanaman seperti kekeringan, serangan hama dan penyakit. Jadi, potensi hasil tanaman merupakan ekspresi dari hasil interaksi antara kemampuan genetik/fisiologik dengan lingkungan tumbuh (tanah dan unsur iklim). Sebab itu potensi hasil tanaman berbeda menurut musim, lokasi dan varietas tanaman yaitu kapasitas anakannya (tillering capacity) (Deyun *et al*. 1991). Tingkat kesesuaian lahan S1 dalam Tabel 4, 5 dan Gambar 11 adalah indikator dari lingkungan untuk mencapai hasil potensial.



Gambar 25. Diagram alir kondisi internal tanaman.
Sumber: Penning de Vries *et al*. 1989; Kroft *et al*. 1994

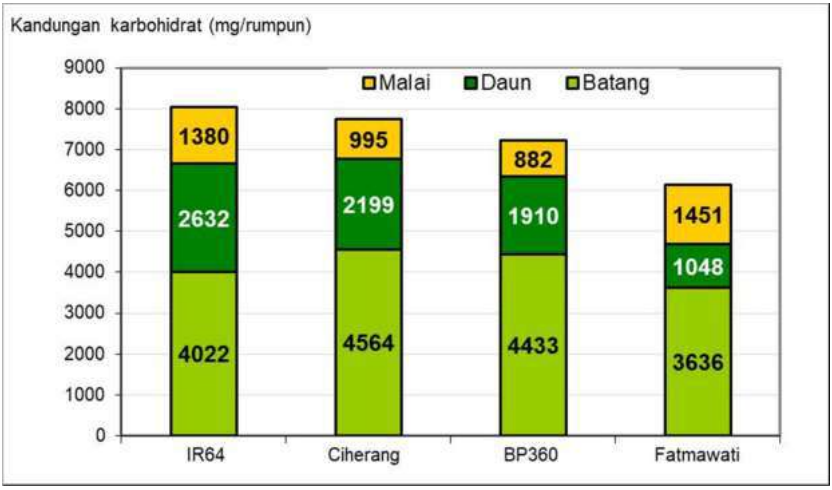
Sebagai contoh, fotosintesis dipengaruhi oleh efektifitas penangkapan radiasi surya melalui bentuk tajuk tanaman, luas daun, sudut daun, ketebalan daun, kualitas daun (ketersediaan hara N, P, K dan hara mikro) serta kelengasan tanah, dan evapotranspirasi. Morfologi dan kanopi daun berpengaruh terhadap besarnya penangkapan radiasi surya oleh varietas tanaman dan morfologinya. Pengaruh kualitas hijau daun ditunjukkan pada Gambar 25. Sebab itu pada kondisi lingkungan yang sama pertumbuhan beberapa varietas, hasil gabah dan biomasnya berbeda pula.

Fotosintesis Bersih

Besarnya energi radiasi surya yang ditangkap tajuk tanaman tergantung pada intensitas radiasi, suhu maksium dan nimum dalam satuan bobot glukosa dalam fotosintesis. Dalam pertumbuhan tanaman sebagian hasil fotosintat digunakan dalam proses respirasi yang menghasilkan energi untuk pertambahan bobot tanaman. Besarnya respirasi dalam satuan glukosa bergantung pada bobot biomas yang terbentuk. Semakin besar tanaman atau semakin berat bobot tanaman semakin besar energi yang dibutuhkan melalui respirasi. Respirasi terjadi terutama di malam hari. Intensitasnya juga bergantung pada suhu udara malam; semakin rendah suhu malam semakin sedikit energi yang dibutuhkan per bobot biomas yang terbentuk. Dengan demikian energi bersih yang tersedia untuk pertumbuhan tanaman adalah selisih antara energi hasil fotosintesis dan energi respirasi.

1. Partisi biomas tanaman

Energi bersih yang tersedia tersebut menyebar ke organ-organ yang akan dibentuk/tumbuh atau disebut *partitioning*/partisi, yaitu ke daun, batang, akar dan ke organ hasil tanaman pada fase generatif tanaman (Lee *et al*., 1991). Partisi itu berbeda antar varietas padi; beda perbandingan antara bobot daun, batang, akar dan malai disajikan pada Gambar 26.



Gambar 26. Partisi dan produksi biomas malai, daun dan batang tanaman padi varietas IR64, Ciherang, BP360 dan Batanghari.
Sumber: Makarim dan Suhartatik (2005)

Pola partisi bobot biomas keempat varietas pada umur 70 hari setelah tanam (hst) (Makarim dan Suhartatik 2005) berbeda seperti disajikan pada Gambar 26. Bobot daun varietas IR64, Ciherang, BP360 dan Fatmawati masing-masing 32,8%, 28,3%, 26,4% dan 17,1% sedangkan bobot malainya (belum mengisi penuh) 17,2%, 12,8%, 12,2% dan 23,7%. Persentase bobot daun menggambarkan bahwa luas daun merupakan *source* karena dapat menangkap radiasi surya (Yoshida 1984), sedangkan bobot malai umur 70 hari setelah tanam menggambarkan besarnya *sink* yaitu tempat menampung glukosa untuk pembentukan gabah. Di sini terlihat bahwa varietas IR64 memiliki *source* yang relatif besar (32,8% dan *sink* rendah-sedang (17,2%); sebaliknya varietas Fatmawati memiliki persentase luas daun yang sempit (17,1%) dan *sink* yang relatif besar (*23,7*%). Varietas Fatmawati diketahui memiliki persentase gabah hampa yang tinggi terutama akibat *source*nya sedikit dan *sink*nya besar sehingga gabah kurang terisi. Dengan

demikian pola partisi biomas varietas-varietas tanaman sekitar umur 70% dapat dijadikan indikator dari varietas-varietas berpotensi hasil tinggi. Perbandingan bobot organ-organ tanaman tersebut selama beberapa fase tumbuh dapat dijadikan indikator spesifik suatu varietas. Angka-angka dalam model simulasi tersebut digunakan sebagai parameter dari varietas dan disimpan dalam database varietas.

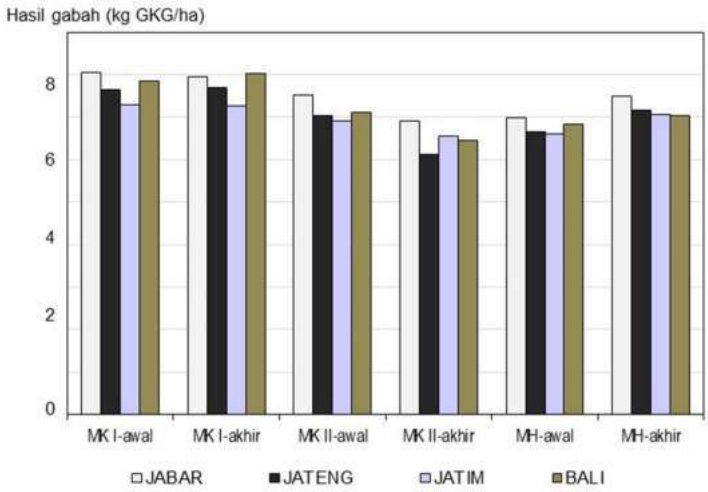
2. Keterkaitan pertumbuhan daun

Perbedaan partisi biomas antara varietas lebih kompleks dan spesifik dalam hal pertumbuhan biomas daun dibandingkan dengan pertumbuhan organ tanaman lainnya. Apabila kecepatan tumbuh daun awal suatu varietas lebih pesat dibandingkan dengan varietas lainnya, berarti varietas tersebut akan menangkap radiasi surya lebih luas pada jangka waktu yang sama yang berarti akan lebih besar pula energi yang diperoleh untuk pertumbuhan organ lainnya. Hal ini tergambar dalam diagram alir pada Gambar 24.

3. Pengaruh waktu tanam (kondisi iklim) terhadap potensi hasil

Potensi hasil varietas di suatu lokasi, akan berbeda karena perbedaan waktu tanam atau musim, meskipun tanah subur dan ketersediaan air cukup. Hal ini terjadi karena pada waktu tanam yang berbeda, suhu udara maksimum dan minimumnya dan intensitas radiasi surya juga berbeda, seperti ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 24. Intensitas cahaya matahari pada 30-45 hari sebelum panen menentukan hasil gabah Fagi dan De Datta, 1981)

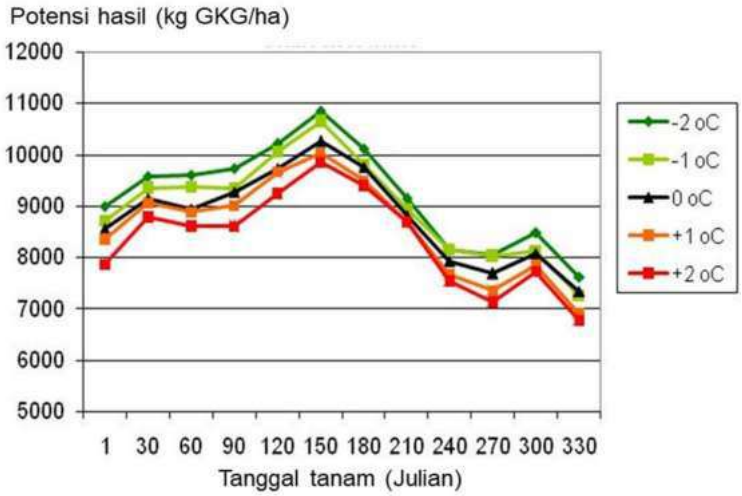
Hasil tanaman padi varietas IR64 berbeda jika ditanam pada MK-1 awal, MK-1 akhir, MK-2 awal, MK-2 akhir, MH awal dan MH akhir di Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur dan Bali (Gambar 27). Pemodelan dapat menunjukkan waktu tanam yang terbaik dalam satu tahun pada suatu lokasi, dengan catatan kendala lainnya tidak ada.



Gambar 27. Perbedaan potensi hasil tanaman padi varietas IR64 yang ditanam di empat provinsi pada waktu tanam yang berbeda. Sumber: Makarim *et al*. (2000)

4. Pengaruh kenaikan suhu udara terhadap potensi hasil tanaman

Pemanasan global akibat dari penumpukan gas-gas rumah kaca di udara, akan berpengaruh terhadap produktivitas tanaman. Dengan model simulasi dapat diduga besarnya perubahan potensi hasil tanaman padi bila terjadi perubahan suhu udara. Pada Gambar 28 ditunjukkan pengaruh waktu tanam padi bila suhu udara naik dan turun antara -2^{o}C hingga +2^{o}C terhadap besarnya potensi hasil padi di Kabupaten Merauke, Papua sebagai contoh. Di Merauke kenaikan suhu udara akan menurunkan potensi hasil tanaman padi. Sebaliknya, penurunan suhu udara menaikkan potensi hasil padi. Dengan model simulasi besarnya pengaruh perubahan iklim terhadap potensi hasil padi dapat diduga. Suhu udara yang tinggi akan mempercepat laju respirasi di malam hari, memperpendek stadia pengisian gabah dan umur tanaman serta meningkatkan kehampaan gabah (Shihua *et al*. 1991; Matsushima 1995).



Gambar 28. Perubahan potensi hasil padi karena perubahan suhu udara pada berbagai waktu tanam di Kabupaten Merauke-Papua.

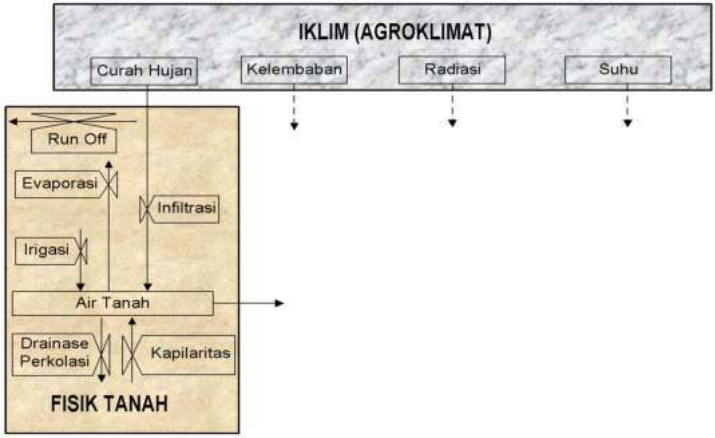
Hasil Tanaman Akibat Berbagai Cekaman

Pada kenyataannya di lahan pertanian pertumbuhan tanaman tidak terlepas dari berbagai cekaman dari lingkungannya, sehingga hasilnya lebih rendah dari potensi hasil. Tingkat penurunan hasil itu bergantung pada intensitas dari cekaman. Cekaman yang umumnya dihadapi disebabkan oleh kekurangan air, kahat hara tanah dan serangan OPT (organisme pengganggu tanaman).

1. Dinamika air dan cekaman kekurangan air

Air merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman. Kebutuhan air tanaman untuk pertumbuhannya berbeda jumlahnya menurut jenis tanaman dan stadia tumbuhnya. Sebab itu apabila ketersediaan air kurang dari yang dibutuhkan, tanaman akan menderita cekaman kekurangan air; konsekuensinya adalah penurunan bobot biomas tanaman. Penurunan bobot biomas tanaman bergantung pada tingkat

keparahan cekaman kekurangan air. Dalam pemodelan hubungan antara proporsi penurunan bobot biomas tanaman dengan tingkat keparahan cekaman pada beberapa stadia tumbuh tanaman ditulis sebagai karakteristik suatu varietas tanaman. Diagram alir lengkap hubungan tanaman-iklim-tanah-air ditunjukkan pada Gambar 24. Dinamika air yang akan berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman ditunjukkan pada Gambar 29. Fisik tanah dan iklim, curah hujan, kelembaban udara, suhu dan radiasi matahari berpengaruh terhadap dinamika air dan terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman. Curah hujan berpengaruh langsung terhadap ketersediaan air di dalam tanah, sedangkan suhu, radiasi dan kelembaban udara berpengaruh tidak langsung terhadap kandungan air tanah.



Gambar 29. Diagram alir keterkaitan antara status air dalam tanah, iklim dan pergerakannya.

Air hujan yang jatuh ke permukaan tanah sebagian akan masuk ke dalam tubuh tanah (infiltrasi), sebagian lagi akan mengalir di atas permukaan tanah (*run off* dan *run on*) dan hilang atau tak terjangkau oleh akar. Air yang masuk ke dalam tubuh tanah (air tanah) ditahan oleh fraksi liat tanah dan bahan organik hingga mencapai kapasitas tanah memegang air (*water holding capacity*). Air yang terus bergerak ke lapisan lebih dalam disebut

air perkolasi. Air hujan tidak cukup mengisi penuh pori-pori tanah tetapi tertahan oleh liat dan bahan organik tersedia bagi tanaman dalam jumlah yang tidak memenuhi kebutuhan tanaman. Evaporasi (penguapan langsung dari tanah) dan dari kanopi tanaman (evapotranspirasi) akan mengurangi air tanah. Kehilangan air yang terus menerus dari tanah menyebabkan sisa air tanah tidak dapat dijerap oleh akar tanaman maka tanaman akan layu. Kandungan air tanah yang menyebabkan tanaman layu secara permanen disebut titik layu (*wilting point*).

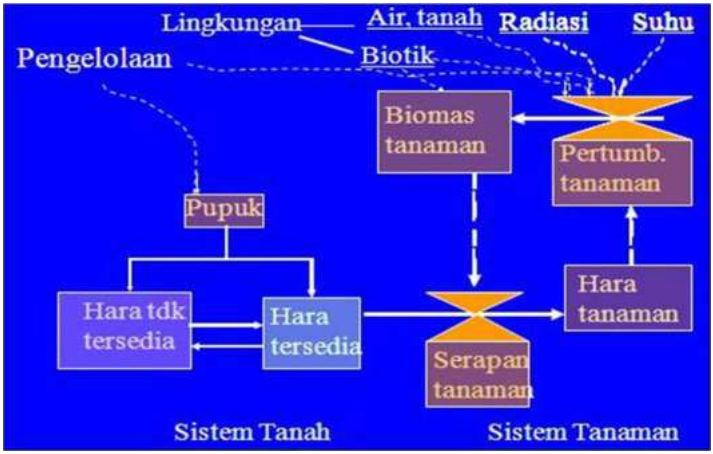
Ketersediaan air tanah bagi tanaman dinyatakan dalam satuan tegangan/tekanan air dalam atmosfor (atm) atau dalam cm Hg. Tegangan air pada kapasitas lapang adalah 1/3 atm, sedangkan pada titik layu adalah 15 atm. Tegangan air pada kondisi jenuh air adalah 0 atm. Kemampuan akar menjerap adalah pada tegangan <15 atm. Cekaman kekurangan air mulai terjadi ketika tegangan >1 atm, atau kadar air di bawah kapasitas lapang. Kadar air tanah berdasarkan persentase bobot tanah tidak dapat dijadikan patokan ketersediaan air karena kadar air yang tinggi pada tanah bertekstur liat belum tentu lebih tersedia dibandingkan kadar air yang lebih rendah pada tanah bertekstur pasir. Tekstur tanah yang berbeda mempunyai tegangan air yang berbeda meskipun kadar airnya sama (Kramer, 1975).

Keseimbangan air dalam tanah terjaga oleh *capillarity rise*, yaitu pergerakan air dari tanah bagian bawah yang lebih lembab ke atas melalui rongga rongga kapiler tanah yang menyebabkan kadar air tanah di lapisan tanah atas naik, meskipun tidak ada penambahan air dari luar. Mekanisme pergerakan air melalui rongga kapiler terutama terjadi pada tanah-tanah bertekstur liat. Jadi, kadar air dalam lapisan olah tanah yang berinteraksi langsung dengan serapan air oleh akar tanaman selalu dalam keadaan dinamis. Dalam praktek indikator ketersediaan air dan kebutuhan irigasi pada tanaman padi ekspresikan dalam konsep *stress day* (Fagi, 1983). Dalam pemodelan ketersediaan air di

lapisan olah indikator tingkat dan lamanya cekaman air. Bila kadar air tanah cukup, cekaman air terhadap tanaman dinilai 1,0; Apabila kadar air tanah menyebabkan tanaman menderita cekaman maka diberi nilai <1,0. Nilai tersebut dinamakan *stress factor.*

2. Dinamika hara dalam Sistem Tanah - Tanaman

Hara dibutuhkan tanaman untuk pertumbuhannya. Kecukupan atau kekurangan hara menyebabkan pertumbuhan tanaman normal atau terhambat. Kecukupan hara, kondisi iklim dan ketersediaan air menentukan pertumbuhan tanaman. Banyaknya hara yang dibutuhkan tanaman bergantung pada bobot biomas tanaman, umur/stadia tumbuh tanaman, jenis dan varietas tanaman. Jumlah hara dalam tanaman tersebut dicukupi dari hara dalam tanah melalui proses penyerapan hara oleh akar tanaman dengan pola tertentu. Keterkaitan erat antara hara tanah dan hara dalam tanaman dipengaruhi oleh berbagai proses yang dinamis dan kompleks, seperti ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 30.



Gambar 30. Diagram alir pergerakan hara di dalam sistem tanah-tanaman dan pengaruh lingkungan.
Sumber: Makarim *et al*. (1992; 1993).

Gambar ini mengilustrasikan bahwa akumulasi biomas tanaman per periode tumbuh adalah hasil dari berbagai proses dalam tanaman sebagai respon terhadap lingkungannya (radiasi surya, suhu, kelembaban udara, ketersediaan air dan hara dalam tanah). Pembentukan dan pertumbuhan biomas tanaman memerlukan hara, maka selama pertumbuhan tanaman diperlukan penyediaan hara tanah secara berkesinambungan. Ketersediaan hara tanah yang terbatas, akan membatasi penyerapan hara oleh akar tanaman dan akan menghambat pertumbuhan tanaman. Gambar 30 mengilustrasikan secara rinci bagaimana teknik budidaya harus dikembangkan sehubungan dengan munculnya hama dan penyakit tanaman yang tidak diuraikan dalam Bab-bab sebelumnya.

Hara dalam Sistem Tanah

Hara dalam tanah, baik yang berasal dari pelapukan bahan induk *in situ* maupun pemupukan dan dari pemberian bahan organik, mengalami proses penumpukan (*nutrient pool*) yang kompleks seperti diuraikan dalam Bab-bab sebelumnya. Kompleksitas itu dipengaruhi kondisi tanah, seperti kemasaman (pH) tanah, tekstur tanah, kadar air tanah, suhu tanah dan aktivitas mikroba tanah. Karakteristk fisik tanah dan kimia tanah adalah penentu dari klasifikasi jenis tanah dan ketersediaan hara bagi tanaman. Sifat fisik tanah dan kimia tanah dan tingkat ketersediaan unsur hara, a.l. N, P dan K, serta kemasaman, alkalinitas dan salinitas disertai oleh unsur iklim (curah hujan dan suhu udara) adalah indikator dari tingkat kesesuaian lahan bagi tanaman (Tabel 4, 5).

Gambar 29 adalah pemodelan yang menjelaskan interaksi antara tanah-tanaman dan unsur iklim dalam proses pembentukan biomas tanaman. Bab VII menjelaskan mekanisme jerapan hara oleh tanaman dan fungsi masing-masing unsur hara dalam pertumbuhan tanaman melalui fotosintesis dan respirasi. Pengelolaan tanah dan tanaman (teknik budidaya) adalah upaya

untuk menyelaraskan penyediaan unsur hara dengan kebutuhan hara tanaman agar fotosintesis dan respirasi berlangsung secara optimal.

Hara dalam Sistem Tanaman

Jerapan hara oleh akar tanaman berlangsung melalui dua mekanisme yaitu, jerapan pasif dan jerapan aktif (lihat uraian dalam Bab VII). Konsentrasi unsur hara yang banyak di dalam sel dan jaringan tidak cukup dipenuhi dengan jerapan pasif yang berupa mekanisme secara fisik. Maka, timbul teori baru bahwa jerapan hara secara aktif juga terlibat dalam akumulasi unsur hara di dalam sel-sel dan jaringan tanaman. Mekanisme jerapan aktif itu berupa konsep *carrier* dan penarikan unsur hara oleh cytochrome. Jerapan hara secara aktif memerlukan energi yang dihasilkan oleh proses metabolism, yaitu respirasi. Unsur hara yang dijerap dengan mekanisme aktif sangat selektif, yang berkenaan dengan fotosintesis dan respirasi. Sebab itu, suhu udara, intensitas cahaya matahari dan tekanan oksigen sangat menentukan.

1. Kebutuhan hara N, P, dan K

Di antara 16 unsur hara yang diperlukan tanaman, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) yang paling banyak diperlukan tanaman, tetapi kurang disediakan oleh unsur N, P, K tanah, terutama unsur N. Jenis-jenis tanah tertentu dapat memenuhi kebutuhan P dan K tanaman, tidak demikian halnya hara N. Fungsi dari masing-masing unsur hara diuraikan dalam Bab VII.

Uraian singkat tentang fungsi penting dari unsur N, P dan K dipetik dari Bab VII:

- N adalah pembentuk molekul protein; purin dan pirimidin adalah komponen dari RNA dan DNA, sedang porphirin adalah senyawa pembentuk klorofil.

- P adalah konstituen dari koenzim NAD dan NADP yang penting dalam reaksi oksidatif-reduktif dalam transfer ion H dalam fotosintesis dan respirasi.
- K adalah unsur yang memfasilitasi pembentukan klorofil dan stabilisasi kandungan air di daun, maka konsentrasi K yang tinggi dijumpai pada jaringan meristem dari organ-organ tanaman yang sedang tumbuh.

Hasil penelitian di 133 lahan pertanaman padi sawah di Jawa dan Bali menunjukkan hubungan yang sangat nyata antara serapan hara N, P dan K saat panen dengan hasil gabah kering giling (GKG) seperti dalam persamaan berikut: (Makarim *et al*., 2000):

- Serapan N (kg N/ha) = 41,16 + 18,76 GKG; r = $0,64^{++}$
- Serapan P (kg P/ha) = 2,81 + 2,427 GKG; r = $0,76^{++}$
- Serapan K (kg K/ha) = 27,53 + 16,16 GKG; r = $0,56^{++}$

Persamaan ini menunjukkan perbedaan kebutuhan hara N, P dan K. Misalnya untuk menghasilkan 5 ton GKG/ha terserap hara N, P dan K masing-masing sebanyak 135 kg N/ha, 15 kg P/ha dan 108 kg K/ha. Hara yang teserap itu berasal dari tanah dan dari pupuk. Informasi seperti ini dapat digunakan dalam pengelolaan hara presisi (*precision nutrient management*) pada sawah irigasi intensif (Dobermann *et al.* 1996).

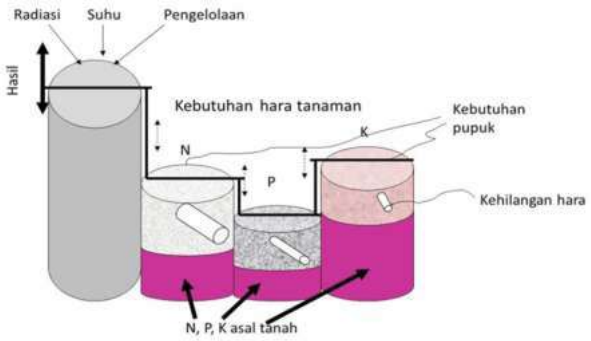
2. Konsep pemupukan berimbang

Data tentang hubungan korelasi antara serapan N, P dan K dengan hasil GKG dalam Bab VIII, dan rumus pemupukan berimbang dalam Bab V mengklarifikasi pengertian tentang pemupukan berimbang, sebagai berikut:

- Pemupukan berimbang dalam sistem tanam adalah takaran pemupukan agar unsur hara tersedia secara proporsional untuk memenuhi proses pertumbuhan tanaman. Kekurangan unsur P dan K akan menyebabkan defisiensi unsur-unsur ini yang gejalanya ditunjukkan dalam Gambar 21. Kelebihan

unsur mikro Fe, Mn, Al yang dijumpai pada tanah masam, seperti tanah podsolik dan sulfat masam akan mengakibatkan keracunan unsur-unsur tersebut dan defisiensi P, K, Ca, Mg, Mo sebagai konsekuensinya gejalanya ditunjukkan dalam Gambar 21.

- Peningkatan serapan N, P dan K secara proporsional dengan teknik budidaya sebanyak duakali lipat dari serapan pada hasil 5,0 t GKG/ha, tidak serta merta dapat menaikkan hasil menjadi 10,0 ton GKG/ha, karena keterbatasan *source* (daya interupsi cahaya matahari oleh daun untuk menghasilkan karbohidrat), juga akibat dari keterbatasan *sink* (potensi genetik varietas mempunyai jumlah gabah/malai terbatas (*limited number of differentiated spikelets*).
- Pemahaman tentang pemupukan berimbang dalam sistem tanah dan tanaman, seperti ditunjukkan dalam bentuk rumus di Bab V, digunakan untuk rekomendasi pemupukan. Pupuk diberikan kalau ketersediaannya di dalam tanah tidak mencukupi kebutuhan tanaman yang disebabkan oleh selain bahan induknya miskin unsur hara tertentu, dan unsur hara lain dari bahan induk yang terlarut hilang bersama perkolasi air. Gambar 31 mengilustrasikan pemupukan berimbang dalam sistem tanah dan tanaman.



Gambar 31. Konsep pemupukan berimbang pada tanaman padi. Sumber: Makarim *et al*. (1992; 1993).

Perkalian faktor efisiensi dengan selisih antara jumlah hara total dan hara asal tanah, adalah jumlah hara yang harus ditambahkan untuk masing-masing hara N, P, dan K dalam bentuk pupuk. Nilai inefisiensi kehilangan pupuk berkisar antara 0,4-0,7 bergantung pada jenis pupuk, kelarutan pupuk, cara pemberian pupuk, tekstur tanah, kemasaman (pH) tanah (Abdulrachman *et al*. 2004). Perlu diperhatikan pada Gambar 31 bahwa dalam konsep pemupukan berimbang jumlah pupuk N, P dan K antar lokasi tidak sama takarannya karena kandungan hara N, P, dan K tanah di lokasi tersebut berbeda. Hal ini dapat dilihat dalam Rekomendasi Pemupukan N, P dan K pada Padi Sawah Spesifik Lokasi. Pemberian jerami padi atau pupuk kandang mengurangi takaran pupuk anorganik N, P, K sebanyak kandungan N, P, K dari jerami atau pupuk kandang (Balitbangtan 2006).

Hasil gabah dari tanaman padi yang tidak dipupuk kurang tepat digunakan untuk menduga status hara P dan K tanah. Hasil gabah dari tanaman yang tidak dipupuk dibatasi oleh rendahnya hara N. N adalah hara utama yang memicu kenaikan hasil. Dapat diduga bahwa hara P dan K tanah cukup tersedia, tetapi kenaikan hasil terhambat karena rendahnya hara N; unsur N memegang peran penting dalam proses fotosintesis dan respirasi, seperti telah diuraikan sebelumnya.

IX
UJI TANAH

Pedoman Umum

Uji tanah berkenaan dengan analisis tanah secara cepat dengan biaya rendah per analisis, dibanding dengan metode konvensional yang lebih akurat (Tabel 8), tetapi perlu waktu lebih lama dan biaya mahal. Uji tanah dapat dilaksanakan secara cepat di lapang, sedangkan analisis tanah dan jaringan tanaman dapat dilaksanakan di laboratorium.

1. Fungsi uji tanah

- Uji tanah melayani permintaan petani individual atau kelompok tentang lahan pertanian yang bermasalah.
- Interpretasi hasil uji tanah mengacu pada hasil-hasil analisis tanah konvensional sebelumnya untuk tujuan kaliberasi dari analisis tanah secara cepat.
- Uji tanah sering dirancang untuk tujuan yang bersifat umum tanpa kaliberasi bagi jenis tanah khusus.
- Uji tanah perlu standarisasi (*standard operation procedure*).

2. Penanganan uji tanah secara massal

- Karena proses uji tanah berlangsung cepat dengan metode sederhana, maka dapat digunakan untuk menganalisis tanah dalam hamparan yang luas.
- Laboratorium induk analisis tanah harus mengawasi prosesnya berdasarkan SOP yang disepakati agar hasilnya lebih akurat.
- Contoh *Soil Test Kit*, adalah *the Purdue Kit*, (*Universitas Purdue*), *the Hellige-Truog Kit*, *the Morgan Type Kit* dan *the Spurway Type Kit* (Jakson 1973), dan BBSDLP (Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian).

3. Contoh tanah untuk uji tanah dalam hamparan lahan

- Lapisan tipis contoh tanah sedalam lapisan olah diambil dari 10-20 titik yang tersebar pada hamparan; titik-titik pengambilan contoh harus mewakili keseluruhan petak hamparan, kemudian dicampurkan dan diaduk.
- Campuran dari 10-20 titik contoh, diulang pada setiap 20-40 ha.
- Contoh tanah dipisah dari posisi pada toposequen atas, tengah dan bawah; masing-masing dianalisis dan diinterpretasi terpisah.
- Hindari pengambilan contoh tanah dari tumpukan jerami/pupuk kandang, batas galengan, saluran mati atau tidak berfungsi.

4. Informasi tentang lokasi sasaran

1) Nomor contoh…….Tanggal……
2) Nomor lokasi……Kabupaten…….
3) Tanaman yang akan ditanam…….
4) Akankah tanaman dipupuk musim depan ? ……..
5) Hasil tanaman musim/tahun sebelumnya ……..
6) Posisi lahan dalam toposequen: atas……....; tengah ……; bawah……..…….
7) Kapan tanah dikapur terakhir kalinya ? …….
8) Jenis dan takaran pupuk yang digunakan ? ……..…….
9) Nama:……; alamat ; ……

5. Ekstraktan untuk uji tanah

- Ekstraktan uji tanah untuk digunakan dalam uji tanah umumnya dipilih untuk menstimulasi kebutuhan hara tanaman atau untuk mengekstraksi semua atau sebagian dari unsur hara dalam bentuk yang tersedia.

- Pada semua hasil dari uji tanah harus dikorelasikan dengan tanggap tanaman terhadap unsur hara yang diperhitungkan dari uji tanah.
- Ekstraktan tersebut harus tidak mengandung ions yang dapat mengintervensi analisis yang akan dilakukan.
- Penggunaan ekstraktan tunggal untuk beberapa unsur hara menghemat waktu untuk menguji beberapa macam unsur hara (lihat BBSDLP).
- Beberapa ekstranktan untuk beberapa tingkat reaksi tanah yang digunakan (Jakson, 1973), adalah:
  (1) tanah mineral yang sangat masam: 0,3*N* HCl (Truog).
  (2) tipe ekstraktan masam yang dibuffer/dinetralisasi lemah: 10% NaOAc dalam 3% HOAc pada pH 4,8 (Morgan)
  (3) larutan dengan konsentrasi sedang dari garam yang bereaksi netral: 3*N* $NaNO_3$ (Bray)
  (4) larutan dengan pelarut yang bereaksi seperti air: 0,025 *N* HOAc (*Spurway*)

6. Interpretasi hasil uji tanah

- Petugas yang bertanggung jawab dalam menginterpretasi hasil uji tanah harus memahami:
  (a) jenis tanah dan zona agroklimat dengan memperhatikan topografi lokasi, kondisi drainase, kedalaman aerasi tanah dan potensi sub-soil (lapisan dalam) sebagai sumber unsur hara.
  (b) pengalaman petani sebelumnya berkenaan dengan pengapuran, pemupukan dan tingkat hasil yang dicapai.
  (c) perbandingan tingkat hasil antara lokasi yang tanahnya diuji dan tingkat hasil dari lokasi lain yang jenis tanah dan iklimnya sama.
  (d) jenis tanaman yang akan ditanam dalam pola tanam berikutnya harus diketahui dan dipahami; sehubungan

dengan hal ini karakteristik perakaran tanaman dan kemampuan akar mengekstrak unsur hara tanah harus dievaluasi

- Pengetahuan (a) s/d (d) digunakan untuk memformulasi pengelolaan tanah di lokasi sasaran dan dalam menentukan perlakuan yang diperlukan.

Pelaksanaan uji tanah secara lebih rinci bergantung kepada ekstraktan yang digunakan.

Kebutuhan Kapur

Semula ion H^+ dapat tukar dalam tanah digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan kapur. Tujuan dari pengapuran , adalah: (a) meningkatkan pH tanah, (b) meningkatkan ketersediaan unsur hara Ca, Mg, P dan K, (c) mengurangi daya racun dari Fe, Mn dan Al karena konsentrasinya yang berlebihan; pH tanah untuk pertumbuhan yang optimal dari tanaman pada kisaran pH 6-7. pH tanah pada kisaran ini selaras dengan pH dari tubuh tanaman.

Teori perhitungan

Teori perhitungan ini adalah kelanjutan uraian tentang miliequivalen dalam Bab III.

∇ Jika suatu mineral liat mempunyai KTK 1 meq/100 gram, mineral liat itu mampu menggeser 1 mg hidrogen atau 1 meq hidrogen per 100 gram mineral liat, disetarakan dengan 1 mg hidrogen per 100.000 mg mineral liat atau 10 mg hidrogen per 1 juta mineral liat (konsentrasi hidrogen = 10 ppm). Maka, lapisan olah seluas 1 acre (1 acre = 0,405 ha) dengan berat lapisan olah 2 juta pound (1 pound = 0,454 kg) dapat menarik 20 pound hidrogen dapat tukar (*exchangeable hydrogen*), Kalau disetarakan dengan sistem metrik: 1 ha lapisan olah dengan ketebalan 15 cm dapat menarik 22 kg hidrogen.

∇ Kebutuhan kapur dapat dihitung seperti contoh berikut:

- 1 meq hidrogen (H) dapat digeser dari koloid mineral liat oleh 1 meq $CaCO_3$ (kapur); berat molekul $CaCO_3$ = 100, mengandung 2 berat equivalen; karena $CaCO_3$ yang diperlukan; maka berat molekul $CaCO_3$ dibagi 2 (100/2 = 50 mg) atau 50 mg $CaCO_3$ untuk menggeser 1 mg hidrogen.
- Berdasarkan fakta bahwa 1 meq H^+ per 100 gram tanah (mineral liat) dapat dinyatakan sebagai 20 pound H^+ per acre lapisan olah; 1 meq $CaCO_3$ per 100 gram = 20 x 50 pound = 1000 pound per acre lapisan olah; maka, 500 kg $CaCO_3$ per acre lapisan olah berpotensi menggeser 1 meq H^+ per 100 gram tanah, dalam *metric system* adalah 1100 kg per ha lapisan olah (lihat Brady, 1974).

Perhitungan melalui analisa laboratorium

Parker (1929) dalam Jakson (1973) menghasilkan prosedur untuk menganalisis ion H^+ dapat tukar dengan rumus perhitungannya:

meq H^+ dapat tukar/100 gram tanah = $(T\text{-}B)x\ N \frac{100}{\text{berat tanah}}$ dimana: T = volume titrasi, B = volume titrasi dari standar (blank); *N* normalitas dari standar NaOH atau $Ba(OH)_2$. Hasil perhitungan diekspresikan juga dalam ton $CaCO_3$ per acre (1 ha = 0,247 acre).

Analisis dengan metode Parker cukup rumit, maka ditawarkan altenatif: metode Mechlich, Brown, Schofield dan Woodruff. Dari semua metode analisis ion H^+ dapat tukar, Jakson (1973) menilai bahwa pH tanah dalam keadaan lembab yang diukur di lapang (dengan pH meter) cukup relevan dalam menghitung kebutuhan kapur. Kondisi lapang masih alami; mikroorgamisme tanah hidup normal. Pengukuran pH dari kontrol tanah kering udara mempercepat proses, maka cara ini yang umumnya digunakan sebagai metode standar. Pengeringan tanah mempercepat reaksi kimia di dalam tanah, maka tanah yang

kering berada pada kondisi equilibrium. Uji tanah cepat yang paling penting adalah pH tanah; pH tanah menginterpretasi hasil dari uji tanah untuk mengetahui ketersediaan unsur hara P, Ca, Mg, Fe, Mn, dan B yang sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Uji tanah masam bersamaan dengan pengetahuan tentang tanaman yang akan dibudidayakan dan jenis tanah (tekstur) adalah dasar dari rekomendasi tentang pengapuran. Tabel 31 adalah petunjuk kebutuhan kapur untuk menaikkan ke pH 6,5.

Tabel 31. Kebutuhan kapur (ton/ha) untuk menaikkan pH tanah mencapai 6,5.

Nilai pH tanah	Pasir dan lempung berpasir (ton/ha)	Lempung debu dan lempung liat (ton/ha)
4	1,5	2,25
4,5	1,25	1,75
5	1	1,25
5,5	0,5	0,75
6	0,25	0,5
6,5	0	0

±/ Data aslinya dikonversi dari ton/acre menjadi ton/ha (1 ha = 0,24711 acre)
Sumber: Jackson (1973)

Catatan (Jakson (1973)

- Setiap meq ion H^+ dapat tukar yang akan dinetralisasi memerlukan 1000 pouns (0,45 ton) $CaCO_3$ equivalen per 2 juta pound tanah (lapisan olah).
- 1,0 ton $CaCO_3$ per acre (per 0,4 ha) lapisan olah diperlukan untuk menetralkan 2 meq H^+ dapat tukar yang ada dalam 100 gram tanah; $CaCO_3$ equivalen itu disebut kebutuhan kapur atau *lime requirement*.

X
PENUTUP

Pelapukan bebatuan, sebagai bahan induk tanah yang berasal dari perut bumi, dipicu oleh iklim, organisme dan relief yang berlangsung selama ribuan bahkan jutaan tahun. Proses pelapukan itu menghasilkan berbagai jenis tanah. Jenis-jenis tanah itu mempunyai karakteristik biofisik, kimia dan biologi tanah yang berbeda-beda. Ciri dari karakteristik tersebut dipilah-pilah sehingga terbentuk klasifikasi tanah. Manusia terlibat dalam perubahan status dari jenis dan klasifikasi tanah melalui kegiatan bercocok tanam, penggundulan hutan di lahan gambut yang datar untuk dikonversi menjadi lahan perkebunan, dan di lereng perbukitan dan pegunungan yang miring untuk ditanami tanaman sayuran dan tanaman pangan lainnya. Lama kelamaan tanah di lahan bergambut dan lahan gambut akan berubah menjadi lahan yang didominasi oleh tanah mineral yang tidak subur. Erosi yang terjadi di lahan miring di lereng perbukitan dan pegunungan menyebabkan lapisan tanah di permukaan terkelupas, sehingga lapisan bawah permukaan timbul yang mengesankan bahwa tanah masih muda. Tipologi tanah dari klasifikasi tanahpun berubah.

Genangan air yang disengaja atau tidak disengaja (air hujan) yang sumber utamanya adalah air hujan, sebagai bagian dari unsur-unsur iklim/cuaca, membedakan lahan pertanaman tanaman pangan menjadi lahan irigasi, lahan tadah hujan, lahan rawa pasang-surut, lahan rawa lebak dan lahan kering. Tipologi dan klasifikasi tanahnyapun berbeda-beda.

Proses metabolisme karbon (gula), lemak dan protein dalam tanaman melalui fotosintesis dan respirasi memerlukan unsur hara dari tanah. Masing-masing jenis tanaman memerlukan persyaratan tumbuh yang spesifik, berkenaan dengan proses metabolisme tersebut, karena jenis-jenis tanaman itu adalah penghasil tepung,

gula, lemak atau protein. Dengan kata lain jenis-jenis tanaman tersebut mempunyai preferensi khusus terhadap unsur hara untuk pertumbuhannya. Inilah yang melatarbelakangi dirumuskannya kesesuaian lahan untuk berbagai jenis tanaman. Fakta ini belum dieksplorasi secara mendalam dalam menentukan pola tanam dan pewilayahan komoditas pertanian. Dalam buku ini dicontohkan tentang pemilihan lokasi pola tanam padi-kedelai berdasarkan syarat pertumbuhannya masing-masing.

Inputs yang ditonjolkan dalam buku ini adalah pupuk, khususnya pupuk anorganik, karena pupuk anorganik untuk tanaman pangan disubsidi oleh pemerintah. Maka, penggunaannya harus efektif dan efisien. Kiat-kiat untuk meningkatkan efektifitas dan efisiensi diuraikan dalam buku ini.

Setelah membaca buku ini pembaca diharapkan lebih memahami mengapa penulis memilih judul buku Adagium Ilmu Tanah dan Fisiologi Tanaman dalam Praktek Pertanian Tanaman Pangan. Manusia dengan akalnya mengelola tanah dan tanaman secara serasi dan harmonis untuk memperoleh pendapatan dari hasil pertaniannya secara maksimum; inilah makna dari adagium.

GLOSARIUM

Glosarium ini hanya mengklarifikasi istilah atau singkatan kata yang berkenaan dengan istilah, tetapi tidak diuraikan, untuk digunakan sebagai pelengkap dari uraian.

Aspek berkenaan dengan jerapan unsur hara

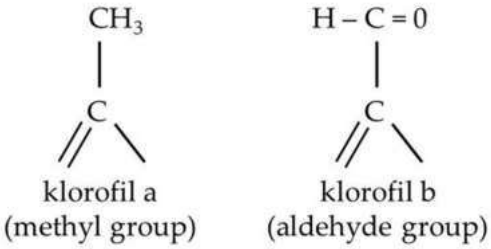
(tidak disusun menurut abjad)

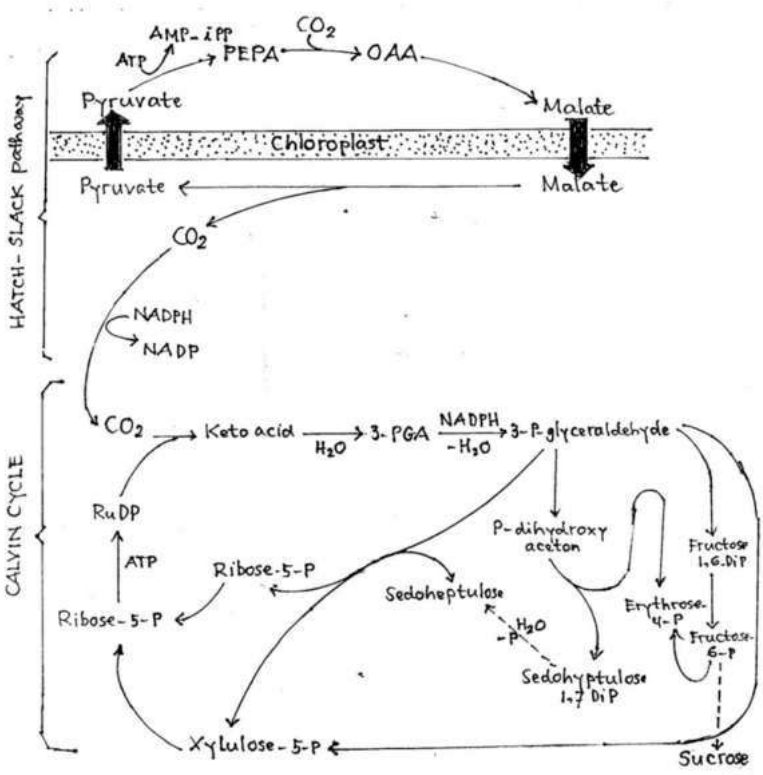
photosynthesis: asimilasi CO_2 yang terjadi dalam hijau daun (chlorophyl) dipicu oleh energi cahaya (sinar matahari) pada kondisi reduktif, proses berlangsung karena adanya air (proses fotosintesis, lihat Gambar)

respiration: proses perombakan karbohidarat yang berupa tepung (starch) atau gula (sukrosa) menjadi CO_2 dan H_2O plus energi pada kondisi oksidatif. (proses respirasi lihat Gambar)

chloroplast: plastid sitoplasmik dengan artikel rumit, dimana fotosintesis berlangsung; isi dari kloroplas dibungkus oleh membram luar dan membram dalam; membram dalam membungkus matriks yang disebut *thylokoids;* keberadaan klorofil dalam kloroplas berfungsi dalam pembentukan membram dalam (lamella).

chlorophyl: pigmen berwarna hijau yang paling aktif dibanding semua pigmen dalam fotosintesis ; formula empiriknya C_{55} H_{72} O_5 N_4 Mg terstruktur seperti raket tenis; dari deretan struktur itu dibedakan klorofil a dan klorofil b.



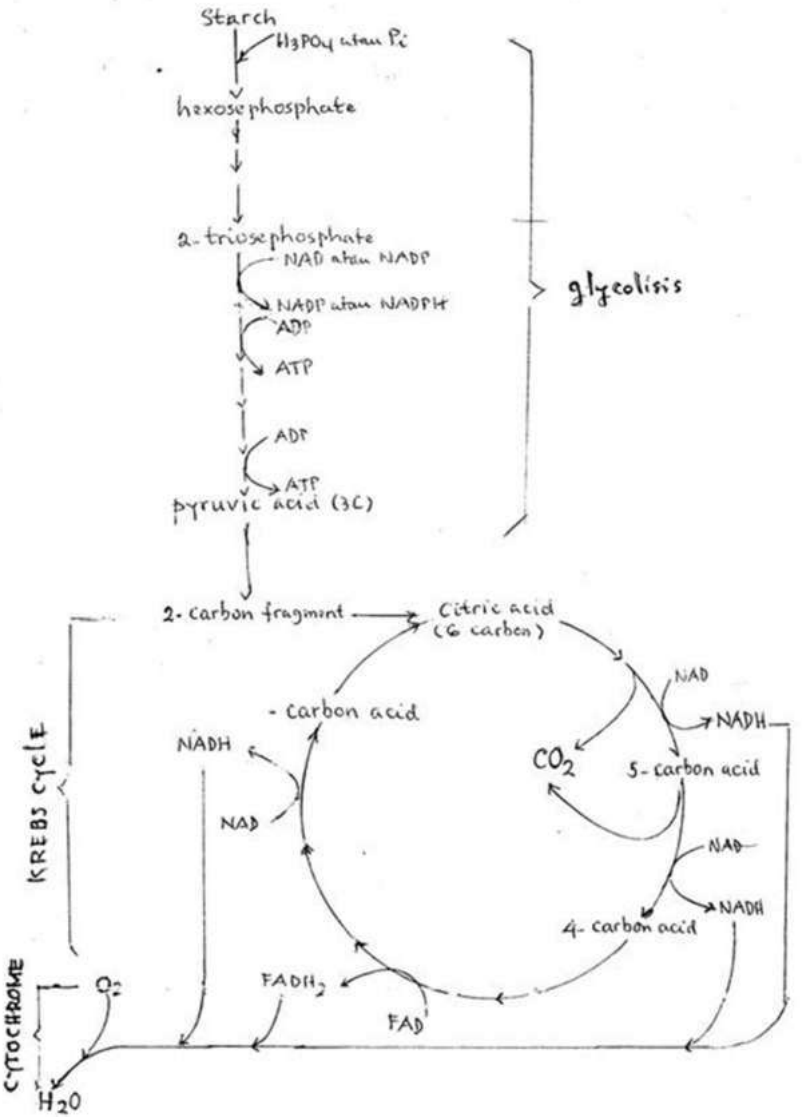


Hatch Slack pathway dan Calvin cycle dalam proses fotosintesis
Sumber: Delvin (1975)

Catatan: ada pendapat bahwa fotosintesis dan resperasi ibaratkan reaksi bolak-balik.

$$CO_2 + H_2O \underset{\text{respirasi}}{\overset{\text{fotosintesis}}{\rightleftharpoons}} (CH_2O) + O_2 + H_2O$$

Dari dua proses yang ditunjukkan dalam dua gambar (proses fotosintesis dan resperasi), tampak bahwa pendapat itu hanya wacana.



Proses respirasi tanaman melalui glycolysis dan Krebs cycle
Sumber: Devlin (1975)

ADP (adenosine diphosphate): coenzyme membawa (acceptor) fosfat menjadi ATP.

ATP (adenosine triphospat): berperan dominan dalam fotosintesis dan respirasi; berfungsi mengubah energi cahaya matahri menjadi enegi kimia.

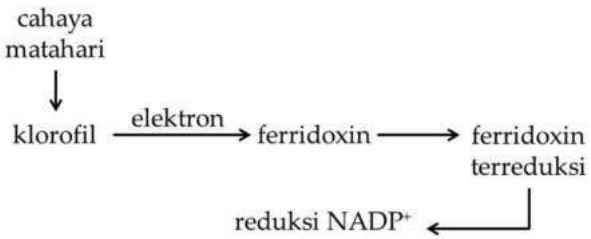
Calvin cycle: assimilasi CO_2 yang dihasilkan dalam Hatch-Slack pathway menjadi sukrosa dalam fotosintesis

cytochrome: pigmen hemoprotein yang berfungsi sebagai enzim pembawa elektron ke molekul oksigen dalam proses respirasi lintas sel pada kondisi oksidasi-reduksi silih berganti.

FAD (flavine adenine dinucleotide)

FMN (flavine mono nucleotide)

FRS (ferredoxim reducing substance): disingkat menjadi ferridoxin, berfungsi sebagai elektron acceptor bagian dari rantai transportasi elektron dalam fotosintesis.



glycolysis: tahap awal dari proses respirasi yang merombak tepung menjadi *pyruvic acid*

Hatch-Slack pathway: fosforilasi dari *pyruvic acid* menjadi PEPA

Hill reation: proses pemecahan air menjadi H^+ dan O_2 karena diionisasi:

$$H_2O + NADP \xrightarrow{\text{cahaya}} \tfrac{1}{2}O_2, + NADPH + H^+$$

Kreb cycle: bagian dari proses respirasi, yaitu perombakan *pyruvic acid* menjadi CO_2, H_2 dan O_2 yang menghasilkan energi.

APS (adenosine phosphosulfate)

NAD (nicotinamide adenine dinucleotide)

NADH: bentuk NAD yang terreduksi

NADP: bentuk NAD yang mengikat fosfat

OAA: oxaloacetic acid

phosphorilation: prose penggabungan fosfat dari ATP ke dalam senyawa glukosa agar menghasikan energi untuk pertumbuhan tanaman

- glucose + ATP $\rightarrow$ glucose – 6 – phosphete + ADP
- pembentukan glutamin dari glutamic acid NH_4^+ glutamic acid + ATP $\rightarrow$ glutamic + ADP + H_3PO_4 (dalam reaksi biokimia Pi sebagai simbul H_3PO_4)
- semua reaksi enzimatik yang melibatkan ATP perlu kation bervalensi dua; urutan penting kation Mg > Mn > Zn.

photochemical act: jerapan dan transportasi dari quantum cahaya ke pusat akumulasi cahaya yang kemudian melepaskan elektron.

photosynthetic quotient: $O_2/CO_2 = 1$

protosynthetic unit: kelompok terkecil dari molekul pigmen penting dalam kloroplas

PPNR (photosynthetic pyridine nucleotide reduction, disebut ferridoxin (enzim mengandung Fe)

photosynthetic phosphorylation: proses terbentuknya ATP dari ADP dalam hijau daun yang dipicu oleh cahaya matahari

$$2ADP + 2\,H_3PO_4 + NADP + 4H_2O \rightarrow \underbrace{2ATP + 2NADPH_2}_{\text{Assimilatory power}} + O_2 + 2H_2O$$

PEPA (phosphoenolpyruvate): phosphorilation dari pyruvic acid dalam Hatch-Slack pathway

plastocyanin: protein mengandung Cu, sebagai donor elektron

3-PGA (3-phosphogliceric acid): konstituen dari glycolysis

RuDP (ribulose – 1,5 – diphophate): penerima (acaeptor) awal dari CO_2

UDPG (uridine diphospho-glucose),
ADPG (adenosine diphosphate-glucose) } aktivasi glucose
UTP (uridine triphosphate)

Aspek bekenaan dengan fisika, kimia dan biologi tanah yang menentukan ketersediaan unsur hara

abiotik: penghambatan pertumbuhan tanaman yang disebabkan oleh faktor yang tidak berupa mahluk hidup (biologi)

adagium: kegiatan bagian badan dari penari atau panduan dari komponis masing-masing menghasilkan gerak yang serasi/harmonis dalam senitari atau orchestra

- pengelolaan tanah dan tanaman yang mampu menyediakan hara sesuai kebutuhan tanaman untuk metabolisme tanaman dengan memanfaatkan potensi agroekosistem.

adhesian (adesi): tarik menarik molekul yang terjadi ketika saling mendekat; - penggabungan bagian (organ) tanaman yang sedang tumbuh.

air tanah: air yang mengisi pori-pori tanah, baik yang tersedia maupun tidak tersedia bagi tanaman

agroecosystem properties: karakteristik lingkungan hidup pertanian yang berpengaruh terhadap produktivitas, stabilitas, sustainabilitas (sustainability), dan equitabilitas (kemerataan) dari potensi komoditas pertanian.

alluvial (alluvium): material (unsur tanah) yang menumpuk atau diendapkan oleh aliran air.

ameliorasi: pemberian bahan organik, kapur dan lain sebagainya untuk memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi tanah.

antroposentris: perilaku perancang kebijakan pembangunan pertanian yang lebih mementingkan kebutuhan manusia (orientasi ekonomi)

Atterberg limit: batasan kandungan air yang berpengaruh terhadap konsistensi tanah

- shrinkage limit: batas minimum kandungan air yang menyebabkan tanah mengkerut saat kering
- plastik limit: batas minimum kandungan air yang menyebabkan tanah plastis dan mudah dibentuk
- liquid limit: batas minimum kandungan air yang menyebabkan tanah lunak/berlumpur, maka mudah hanyut oleh aliran air.

Bagan Warna Daun (Leaf Color Chart): petunjuk dalam bentuk bagan warna yang disandingkan dengan daun (tanaman padi) untuk menentukan warna dari klorofil kaitannya dengan tingkat kebutuhan nitrogen (N) tanaman yang digunakan untuk menentukan takaran pupuk N (uren/ZA)

bahan organik tanah: hasil dekomposisi serasah tumbuhan, bangkai hewan, asam-asam organik

bakteri (organisme) aerobik: kelompok bakteri (organisme) yang tumbuh kalau ada oksigen

bakteri (organisme) anaerobik: kelompok bakteri (organisme) yang tumbuh kalau tidak ada oksigen

biotik: penghambat pertumbuhan tanaman yang disebabkan oleh mahluk hidup (hama/penyakit tanaman)

biofisik: faktor lingkungan (tanah, iklim, ketinggian, kemiringan) yang mempengaruhi teknik budidaya dan pertumbuhan tanaman.

cekaman air (water stress): kondisi iklim (curah hujan) yang menyebabkan pertumbuhan tanaman terganggu karena kekurangan air.

colluvial (colluvium): material (unsur tanah) yang terkelupas oleh aliran air dan diendapkan di bagian hamparan yang letaknya lebih rendah

cohesion (kohesi): daya tarik (atraksi) antar molekul sehingga partikel-partikel (pembentuk) tubuh tanaman bersatu secara utuh dan masal.

dolomit: hasil tambang berupa bebatuan yang mengandung Ca dan Mg

drainase: pergerakan air dari lahan pertanian baik yang terjadi secara alami maupun yang dibuat sehingga kandungan air tanah berkurang

ecological farming: pertanian yang berbasis daya dukung sumberdaya alam dan mampu melestarikan lingkungan dan efisien.

ekosentris: perilaku perancang pembangunan pertanian yang lebih memperhatikan kelestarian daya dukung sumberdaya alam dan lingkungan

eko-antroposentris: perilaku perancang pembangunan pertanian yang memperhatikan kebutuhan manusia dengan tetap mempertahankan kelestarian lingkungan

eradikasi: pemusnahan total semua faktor yang mengganggu pertumbuhan tanaman.

efisiensi pupuk: perbandingan antara satu unit hasil dengan satu unit pupuk yang diberikan (kg hasil panen per kg pupuk yang diberikan)

emisi gas rumah kaca (GRK) ; konsentrasi GRK yang dilepaskan (menguap) ke atmosfir dalam satuan luas per satuan waktu (kg/ha/hari atau kg/ha/musim.

ferolisis: proses pelapukan mineral yang disebabkan oleh regim air tanah (kondisi aerob silih berganti dengan kondisi anaerob) dalam jangka panjang.

fitoremediasi: penanggulangan pencemaran lahan pertanaian dengan menggunakan berbagai jenis vegetasi (a.l. mengurangi atau menyerap logam berat.

Gas Rumah Kaca (GRK); gas CO_2, CH_4, N_2O, dll. yang menyumbang terhadap pemanasan global.

hara makro: unsur hara utama yang diperlukan tanaman dalam jumlah yang relatif banyak (N, P, K, Ca, Mg, S)

- hara makro primer: diperlukan paling banyak N, P, K)
- hara makro sekunder: diperlukan lebih sedikit dari hara makro primer (Ca, Mg, S)

hara mikro: unsur hara yang diperlukan tanaman dalam jumlah sangat sedikit

imobilisasi: konversi ion hara (anorganik) ke bentuk organik (diikat sehingga tidak tersedia bagi tanaman, atau sebagai bagian dari unsur pembentuk jaringan tanaman)

irigasi: pemberian air ke tanaman (pengairan) untuk memenuhi kebutuhan air tanaman

- dilengkapi dengan saluran pintu pembagi dan pengukuran debit air (irigasi teknik)
- dilengkapi dengan saluran tanpa pintu pembagi, tetapi debit air tidak terukur (irigasi non teknis)
- irigasi sedeharna: irigasi pedesaan (non-teknis) untuk pertanian tadah hujan basah.

jaringan tanaman: kumpulan dari sel-sel dalam bentuk dan fungsi yang sama membentuk bagian –bagian dari tubuh tanaman (akar, batang, cabang/ranting, daun, dan bunga)

jasa lingkungan: kegiatan yang terorganisasi untuk mengurangi dampak negatif dari kerusakan lingkungan (banjir, erosi/longsor, kekeringan, polusi, keanekaragaman hayati atau plasma nutfah)

kahat hara: kekurangan unsur hara (makro atau mikro) yang menghambat pertumbuhan tanaman.

kaliberasi hasil uji tanah: tahapan dari uji tanah untuk menentukan rekomendasi pemupukan atau ameliorasi tanah

kejenuhan tanah (soil fatigue): batas maksimum daya dukung tanah yang menghambat pertumbuhan optimum tanaman dan laju kenaikan hasil akibat dari perlakuan intensif terus-menerus sehingga terjadi ketidakseimbangan fisika, kimia dan biologi tanah (soil physical-chemical-biological properties)

kejenuhan basa: nilai kandungan Ca, Mg, K, Na tanah dalam persen dari total kepastian tukar kation tanah (KTK-tanah)

konservasi: upaya perlindungan ekosistem (lahan) dari kerusakan akibat ulah manusia

konversi: perubahan tataguna lahan yang bersifat positif atau negatif terhadap perkembangan pertanian dan kelestarian sumberdaya lahan

lapisan besi atau mangan: lapisan tanah di bawah lapisan olah yang memadat dan mengandung besi atau mangan; bahan induk tanah adalah volkan berpasir

lapisan olah: lapisan terdalam (optimum) dimana akar tumbuh dan berkembang pada kedalaman sekitar 20 cm

lapisan tapak bajak: lapisan di bawah lapisan olah yang mengeras dan padat akibat pengolahan dengan bajak dan koloid tanah mengendap bersamaan dengan tekanan berat dari alat pengolah tanah (traktor) dan tekanan dari kaki pekerja

LISA (low-input sustainable agriculture): sistem pertanian dengan masukan rendah untuk menjaga kelestarian lingkungan

logam berat: kelompok logam (Hg, Pb, Cd, Cr, Co, Mo, Mn, dan Ni) dengan bobot molekul dan berat jenis > 4 g/cm^3, nomor atom 22-34 dan 40-50

mineral primer: mineral yang terbentuk langsung dari pengkristalan senyawa-senyawa dalam magma berbentuk fraksi pasir dan sebagian fraksi debu; sifat fisik dan kimianya sama dengan batuan induknya

mineral sekunder: mineral liat yang berukuran halus (<2 μm), terbentuk pada proses pembentukan tanah sebagai hasil dari pelapukan kimia, maka susunan kimianya sama dengan aslinya

- kuarsa, ilmenit, rutil dan zirkon adalah mineral sekunder yang tahan terhadap pelapukan fisik dan kimia

mitigasi GRK: teknologi untuk menekan tingkat atau laju pelepasan CO_2, CH_4, N_2O ke atmosfer

MOL (mikro organisme lokal): mikroorganisme yang ditumbuhkan dari tanaman/tumbuhan alami di lokasi sebagai pengganti pestisida fabrikan

NGO (non-government organization); lembaga swadaya masyarakat; kegiatan tidak diatur oleh pemerintah dengan tujuan untuk mengoreksi program pembangunan dan pelaksanaannya yang tidak aspiratif dengan masyarakat

netrogenase: enzim spesifik untuk penambatan N_2 dari udara secara hayati.

PTT (Pengelolaan Tanaman dan Sumberdaya Terpadu): pendekatan dalam peningkatan produksi tanaman pangan yang spesifik lingkungan (daya dukung sumberdaya) untuk meningkatkan efisiensi produksi dengan menjaga kelestarian daya dukung lahan.

pemupukan berimbang: pemberian pupuk sesuai kebutuhan tanaman dengan memperhitungkan ketersediaan unsur hara dalam tanah.

pelandaian laju kenaikan produksi (leveling off production); penambahan per unit inputs (masukan) tidak diikuti oleh peningkatan produksi.

pemupukan spesifik lokasi: pemberian pupuk, jenis dan takarannya sesuai dengan jenis dan status hara tanah di lokasi sasaran program peningkatan produksi.

petak omisi: petakan penelitian untuk memformulasi SSNM, dipopulerkan sebagai pemupukan spesifik lokasi.

pupuk anorganik: pupuk yang dihasilkan oleh pabrik pupuk (urea, ZA, TSP, SP-36, KCl, pupuk ponska, dll.)

pupuk hayati (biofertilizier): pupuk yang komponen utamanya adalah mikroba.

pupuk majemuk: pupuk yang mengandung lebih dari satu unsur hara.

pupuk organik: sisa-sisa tanaman, kotoran hewan/manusia yang berbentuk padat atau cair yang diproses menjadi kompos.

pupuk tunggal: pupuk pabrikan yang mengandung hanya satu jenis unsur hara (urea-N, SP36-P, KCL-K).

reformasi agraria: perubahan peraturan dan perundangan agraria untuk membuka akses petani ke lahan pertanian dan mencegah konversi semena-mena lahan pertanian ke non-pertanian.

regolith: warna-warna yang menyelimuti profil tanah

rembesan air (seepage): keluarnya air dari petak sawah melalui bocoran galengan sawah.

salinitas: tingkat keragaman yang ditentukan oleh konsentrasi NaCl di dalam air.

SSNM (Site Specific Nutrient Management): pengelolaan hara tanaman spesifik lokasi; diformulasi dari petak omisi.

SRI (System of Rice Intensification): sistem produksi padi sawah yang diintroduksi dari Madagaskar yang mengutamakan masukan organik (pupuk dan pestisida organik); tidak mentabukan penggunaan teknologi tradisional, a.l. varietas padi lokal.

sedimentasi: penimbunan tanah yang tererosi pada sungai atau waduk sehingga mengurangi kapasitas tampung air untuk pertanian, dsb.

simbiosis: hidup bersama antara dua organime yang berbeda, dan interaksinya saling menguntungkan atau merugikan.

soil sickness (lahan sakit): sebutan lain dari soil fatigue.

Soil Test Kit: perangkat uji tanah dilengkapi dengan alat dan bahan kimia; kandungan hara tanah diestimasi dari campuran contoh tanah dan bahan kimia yang menghasilkan warna; warna ini yang dicocokkan dengan standar sebagai indikator dari nilai kandungan unsur hara.

sustanability: salah satu karakteristik dari lingkungan pertanian (agro ecosystem properties); berarti keberlanjutan

TOT (tanpa olah tanah): benih ditanam (ditugal) pada petakan yang tanahnya tidak diolah; di Amerika Serikat disebut conservation tillage:

- zero tillage: tanpa olah tanah
- minimum tillage: olah tanah minimum, seperti diterapkan pada padi walik jerami di lahan sawah tadah hujan.
- full tillage: olah tanah sempurna-dibajak diikuti olah rotovasi bungkahan tanah (pada padi sawah irigasi setelah rotovasi dilanjutkan dengan pelumpuran.

teknologi pertanian ramah lingkungan: istilah lain dari ecological farming; komponen teknologinya adalah LISA.

Uji Tanah: analisis kimia tanah untuk mengetahui status hara tanah secara cepat dan murah dengan menggunakan Soil Test Kit.

USG (Urea Super Granule); butiran urea yang diperbesar untuk mempermudah pembenaman urea agar mengurangi penguapan nitrogen berupa ammonia (NH_3).

volatilisasi amoniak: hilangnya nitrogen dari permukaan sawah dalam bentuk amoniak (NH_3)

water holding capacity: kemampuan tanah menahan air atau memegang air.

zonasi pertanian: pewilayahan komoditas pertanian berdasarkan kesesuaian lahan (tanah dan iklim) dan potensi pasar (preferensi petani).

DAFTAR PUSTAKA

Abdulrachman, S., Z. Susanti dan Suhana. 2004. Efisiensi penggunaan pupuk pada tanaman padi selama dua musim berturut-turut. Penelitian Pertanian Tanaman Pangan 23(2):65-72.

Abdurahman, A. 1993. Laporan Akhir UACP-FSR Proyek Penelitian Penyelamatan Hutan Tanah dan Air. Badan Litbang Pertanian, 66 hal.

Alihamsah, T. 2005. Pengembangan Lahan Rawa Lebak untuk Usaha Pertanian, Balittra, Banjarbaru, 53 hal.

Alexander, M. 1961. Introduction to Soil Microbiology. John Wiley & Sons, Inc. New York, London, 472p.

Aubert, M. G, M . L. Audidier, M. J. Bustarret, M.R. Chaminade, M. A Daujat, M. H. Herru, M. P. Prevot and M. M. Rossin. 1965 Information on Tropical and Sub-tropical Fertilization. Agronamist's Index-Cards-1 Fertilite, Revue Trimestrieile, April-Mai, 1965

Balingtan. 2015a. Petunjuk Teknis. Budidaya Padi Gogorancah. Peluang Intensifikasi dan Ekstensifikasi P.T. Kanisius, Yogyakarta, 45 hal.

Balingtan. 2015b. Petunjuk Umum. Embung, Tandon Air untuk Pertanian Skala Kecil. P.T. Kanisius, Yoyakarta. 26 hal.

Balitbangtan (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian) dan IRRI. Rekomendasi Pemupukan Padi Sawah melalui Internet dan HP.

Balitbangtan. 2006. Pedoman Umum Budidaya Pertanian pada Lahan Pegunungan. Peraturan Menteri Pertanian, No. 47/Permentan/OT.140/10/2006.

Balitbangtan. 2007. Rekomendasi Pemupukan N, P dan K pada Padi Sawah Spesifik Lokasi. Peraturan Menteri Pertanian No. 40/Permentan/OT.140/4/2007.

Balitklimat. 2003. Atlas Sumberdaya Iklim Pertanian Indonesia Skala 1: 1.000.000. Badan Litbang Pertanian Kementerian Pertanian.

Baver, L.D 1966. Soil Physics. John Wiley & Sons. Inc New york, Charles E. Tuttle Co. Tokyo, 487 P.

Blume, H.P and E. Schlichting. 1985. Morphology of Wetland Soil: In Wetland Soils: Characterization, Clasification and Utilization. Proc. Workshop, IRRI, 29 March-5 April 1984. IRRI. Los banos, Laguna, Philippines, pp 161-176.

Brady, N. 1974. The Nature and Properties of Soil. Macmillan Pub. Co. Inc, Mew York; Collier MacMillan Pub. London. 639 p.

Boul, S.W, F. D. Hole and R. s. Mc Craken. 1973. Soil: Genesis and Classifications. Oxford & IBH Pub. Co, GG Janpath, Mew Delhi 10001, 360 p.

Buresh, R.J., S.K. De Datta, M.I. Samson, Sakron Phongpan, Patoon Snitwangses, A. M. Fagi and R. Tejasawarna. 1991. Dimitrogen and Nitrous Oxide Flux from Urea Basally Applied to Puddled Rice Solis. Soil Sci. Soc. Amer. J. 55 (1), pp 268-273.

Buresh, R.J. and A. Dobermann. 2010. Organic Materials and Rice. Annual Rice Forum 2009. Phil Rice & SEARCA, pp. 17-33.

Canpotex. 2004. Planter´s Diary 2004. Oxford Grafic Printers Pte Ltd. Singapure.

Conpotex and IPNI. 2007. Planters´ Diary 2007. Oxford Graphic Printers Pte Ltd. Singapure.

Conpotex and IPNI. 2009. Planters´ Diary. Conpotex Int. Pte. Limited. www. Canpotex. Com.

Canpotex & IPNI. 2010. Planters´ Diary 2010. Web.hattp//sincheedtp. Wet paint. Com

Cosico, W. C. 2010. Overview of Organic Fertilizer Use in Rice in The Philippines. Annual Rice Forum 2009. Revisiting the Organic Fertilizer Issue in Rice. Phil Rice & SEARCA. pp. 1-15.

CSR (Centre for Soil Research)-FAO. 1983. Reconnaissance land resource surveys 1 : 250.000 scale. Atlas Format Procedurs. AGOF/INS/76/006, Manual 4, Version 1.

De Datta, S.K., R.W. Herdt, K.A. Gomes and R. Baker. 1978. Handbook for Integrated Experiment-Survey Yield Constraints Methodologi (preliminary draft). IRRI, Los banos, 70 p.

De Datta, S.K. 1981. Principles and Practices of Rice Production. John Wiley & Sons, New York. 618 p

Departemen Pertanian. 1989. Inaugural Address by the Junior Ministry of Agriculture. Dalam Laporan Hasil Seminar on Sulfur Fertilizer Policy for Lowland and Upland Rice Cropping Systems in Indonesia. Kerjasama Departemen Pertanian dan ACiAR, Jakarta 18-20 Juli, 1989

de Rozari, M. B., Koesoebiono, N. Sinukaban, D. Murdiyarso, and A. K. Makarim. 1992. Socio-economic impacts of climate change. Agromet, Jurnal Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia. Vol.VII, No.1. 51 halaman.

Deyun, P., W. Zhaoqian, and Y. Lijiao. 1991. Simulation of tillering and potential production of indica rice. *In*. F.W.T. Penning de Vries et al (eds.). Simulation and systems analysis for rice production (SARP). Pudoc, Wageningen. p. 94-101.

Devlin, R. M. 1975. Plant Physiology. D. Van Nostrand Co., New York, Toronto, London, Melbourne, 600 p.

Ditjen PSP (Direktorat Jenderal Prasarana dan Sarana Pertanian). 2013. Cetak Biru: Program Nasional Pengembangan Sistem Usaha Pertanian Berbasis Tanaman Pangan di Lahan EX-PLG. Draft didiskusikan pada hari Senin, 8 Juli 2013 (dipersiapkan oleh A. M Fagi, Subagio dan Adimesra Djulin).

Dobermann, A., K.G. Cassman, S. Peng, Pham Sy Tan, Cao Vhan Phung, P.C. Sta Cruz, J.B. Bajita, M.A.A. Adviento, and

D.C. Olk. 1996. Precision nutrient management in intensive irrigated rice systems. Proceeding International Symp. Maximizing Sustainable Rice Yield through Improved Soil and Environmental Management. Khon-Kaen, Thailand p.133-154.

Duiker, W. 1996. Research in An Ecoregional Framework for Sustainable Landuse and Food Production Report of Symposium ISNAR, Briefing Paper 26, February 1996.

Fagi, A.M 1977. Term Paper. Soil Science 260. University of the Philippines at Los Banos (tidak dipublikasi).

Fagi, A.M. and S.K. De Datta. 1981. Environmental Factors Affecting Nitrogen Efficiency in Flooded Tropical Rice. Fertilizer Research 2 (53-67). 1981.

Fagi, A.M. and S.K. De Datta. 1983. Physical Properties of Rainfed Wetland Rice Soils as Affected by Cropping Systems and Crop Residue Mnagement. Field Crop Research 6 (189-204). 1983

Fagi, A.M. dan S.A. Sanusi W. 1983. Meningkatkan Efisiensi Air Irigasi dengan Teknik Budidaya Tanaman dan Teknik Pengairan. Dalam Risalah Lokakarya Penelitian Padi, Cibogo. Bogor, 22-24 Maret 1983.

Fagi, A.M. and C. Mackie. 1983. Watershed Management in Java´s Uplands: Past Experience and Future Directions. In Conservation Farming on Steep Lands. Soil and Water Conservation Soc., Iowa, pp 254-264.

Fagi, A.M. 1986. Reduced Tillage Practices for Food Crops Cultivation in Indonesia. In Minimum Tillage. Proc. Int. Symp. on Minimum Tillage. Bangladesh Agricultural Research Council, Dhaka Feb. 26-27, 1986. pp. 112-132.

Fagi, A.M. and A.K. Makarim. 1990. Pelestarian Swasembada Beras: Tantangan dan Peluang. Dalam Risalah Rapat Kerja Puslitbang Tanaman Pangan, Maros 30 Mei-3 Juni 1990, hal. 1-20.

Fagi, A. M. I. Las, M. Syam, A. K. Makarim dan A. Hasanuddin. 2003. Penelitian Padi Menuju Revolusi Hijau Lestari. Balai Penelitian Tanaman Padi. Badan Litbang Pertanian, 68 hal.

Fagi, A.M. 2015. Sumbangan Pemikiran: Strategi Pencapaian dan Pemantapan Kemandiriaan Pangan. IAARD Press, 266 hal.

Fagi, A. M. 2016. Supporting Evidence for BPP Discussion. Submiffed to be discussed by Technical Advisory Board, Michigan State University, 30-31 Aug.

Follet, R, P, S.C. Gupta and P.G Hunt. 1987. Soil Conservation Practices: Relalition to the Management of Plant Nutrient for Crop Productions. In Soil Fertility and Organic Matter as Critical Component for Production Systems. Soil Sci. Soc. Amer. Special Publication Res. Inst. IFPRI Report, 29 p.

Huke, R. 1976. Geography and Climate of Rice. In Climate and Rice. Proc. Symp. IRRI, Los Banos, Philippines, pp 31-50.

IAARD (Indonesian Agency for Agricultural Research and Development) 2013. Integrated Crop Management (ICM) of Lowland Rice. Science. Innovation. Network IAARD, Ministry of Agriculture.

IRRI. 1997. The Ecoregional Initiative for for the Humid and Sub-Humid Tropics and Sub-Tropics of Asia (ECON-I). IRRI, Po Box 933, Manila, Philippines (a discussion paper).

IRRI (International Rice Research Institute). 1999. Rice: Hunger or Hope. IRRI, Los Banos, Laguna, Philippines. 57 p

IRRI. 1989. IRRI Toward 2020 and Beyond. IRRI, PO Box 933, 1099 Manila, Philippines, 22 p

Jackson, M.L. 1973. Soil Chemical Analysis. Prentice Hall of India Private Limited, New Delhi, 498 p.

Koenigs, F.F.R. 1990. A. "sawah" profile near Bogor. Trans. IV Int. Congr. Soil Sci. 1: 297-300.

Kompas. 2016a. Subsidi Pupuk Bebani Fiskal. Pemerintah Sedang Kaji Bantuan Langsung ke Petani. Kompas/Ekonomi, Jum´at 24 Juni 2016. hal 22.

Kompas. 2016b. Subsidi Sebaiknya Langsung. Banyak Kementerian dan Lembanga Mengurusi Pupuk. Kompas, Sabtu 25 Juni 2016 (Ekonomi) hal 17.

Kramer, P. J. 1975. Plant and Soil Water Relationship. A Modern Synthesis. Tata Mc Graw Hill, Pub. Co. Ltid, New Delhi, 482 p.

Krisnawati, S., M. Husein Sawit dan S. Brotonegoro. 1988. Pendekatan dan Metodologi Penelitian Diskripsi Daerah Studi. Dalam Pendekatan Agroekosistem pada Pola Pertanian Lahan Kering. Badan Litabang Pertanian dan the Ford Foundation, hal. 47-66.

Kropff, M.J., H.H. van Laar, R.B. Matthews, editors. 1994. ORYZA1: an ecophysiological model for irrigated rice production. SARP. Research Proceedings. Wageningen (Netherlands): IRRI/AB-DLO. 110 p.

Lee, M.H., J.C. Shin and R.K. Park. 1991. Patterns of partitioning of carbohydrates in rice crops with different transplanting dates. In. F.W.T. Penning de Vries et al (eds.). Simulation and systems analysis for rice production (SARP). Pudoc, Wageningen. p. 85-93.

LPT (Lembaga Penelitian Tanah). 1969. Naskah Peta Tanah Eksplorasi Djawa dan Madura. LPT No. 1969. 69 hal.

Makarim, A.K., A. Hidayat and H. ten Berge. 1991. Dynamics of soil ammonium, crop nitrogen uptake, and dry matter production in lowland rice. In: F.W.T. Penning de Vries, H.H. van Laar and M.J. Kropff (eds.) Simulation and Systems Analysis for Rice Production (SARP). Pudoc, Wageningen, The Netherlands. p.214-238.

Makarim, A.K., S. Purba, A. Kartoharjono., I. Las, S. Roechan, dan S. Adiningsih. 2000. Pengujian sistem *prescription farming* pada pola IP Padi 300. Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan 19(3):13-24.

Makarim, A.K., I. Las, A.M. Djulin dan Sutoro. 1999. Penentuan takaran pupuk untuk tanaman padi berdasarkan analisis sistem dan model simulasi. Agronomika I(1):32-39.

Makarim, A.K. and E. Suhartatik. 2005. Partial efficiency concept in new rice plant type as indicated by N uptake. IRC proceeding. Denpasar, Bali

Makarim, A. K. 2003. Modeling pengelolaan tanaman padi. Dalam B. Suprihatno dkk (eds.) Buku 2: Kebijakan Perberasan dan Inovasi Teknologi Padi. ISBN 979-8161-85-8. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Halaman 181-188.

Makarim, A.K., A. Hidayat, S. Roechan, I. Nasution, M.F. Muhadjir, S. Ningrum, M. Djazuli dan Murtado. 1992. Status P dan pendugaan keperluan pupuk P pada padi sawah. Prosiding Lokakarya Penelitian Komoditas dan Studi Khusus. Vol.III:199-209.

Makarim, A.K., Ponimin Pw., S. Roechan, Sutoro, O. Sudarman dan A.Hidayat. 1993. Peningkatan efisiensi dan efektivitas pemupukan N pada padi sawah berdasarkan analisis sistem. Prosiding Simposium Penelitian Tanaman Pangan III. Jakarta/Bogor. Hal.675-681.

Mamaril, C. P, R. B. Diamond and P. J. Stangel. 1985. INSFFER and the Management of Wetland Soils for Greater Rice Production. In Wetland Soils: Characterization, Classification, and Utilization, IRRI, AiD/USDA, Burean of Soils-Philippines

Mamaril, C. P., M. B. Castillo and L. S. Sebastian 2009. Facts and Myths about organic fertilizers. Philippines. Rice Research Institute, Nueva Ecija, Philippines.

Manwan, I. and A. M. Fagi. 1989. N, P, K Fertilization for Food Crops. Present Status and Future Challenges. In Seminar on Sulfur Fertilizer Policy for Lowland and Upland Rice

Cropping Systems in Indonesia. Kerjasama Depatemen Pertanian dan ACIAR, Jakarta 18-20 Juli 1989, hal 395-409.

Matsushima, S. 1995. Physiology of high yielding rice plants from the viewpoint of yield components (Chapter 8). In. Matsuo et al. Science of the Rice Plant. Volume Two: Physiology. p.737-753.

MEE (Masyarakat Ekonomi Eropa), BPPT, BPS, Departeen Pertanian, Bulog dan BMKG (BadanMeteorologi dan Geofisika). 2000. Meteorological Issue; Rice Crop Monitoring. Production Outlook. About SARI Project. SARI, Indonesian Rice Bulletin Vol. 1, No. 1, April 2000 (http://sari.bn3.com)

Meyer, B.S. and D.B. Anderson. 1959. Plant Physioloy D. Van. Nostrand Co., Inc. New Jersey; Maruzen Co. Ltd., Tokyo, 784 p.

Moormann, F. R. and N. Van Breemen. 1978. Rice: Soil, Water, Land, IRRI, Los Banos, Laguna, Philippines 185 p.

Moormann, F. R. and H. T. J. Van de Watering 1985. Problems in Characterizing and Classifying Wetland Soils. In Wetland Soils: Characterization, Classification and Utilization Proc. Workshop. IRRI, 26 March-5 April 1984. IRRI, Los Banos, Laguna, Philippines, pp 53-68

Noor, M. 2007. Rawa Lebak: Ekologi, Pemanfaatan dan Pengembangannya. P.T. Raja Grofindo Persada Divisi Perguruan Tinggi, Jakarta, 274 hal

Novisan. 2002. Petunjuk Pemupukan yang Efektif. Agro Media Pustaka, 114 hal

Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge and A. Bakema. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Simulation Monographs 29. IRRI Los Banos and Pudoc Wageningen. 271 p.

Ponnamperuma, F. N. 1985. Chemical Kinetics of Wetland Soils: Characterzation, Classification and Utilization. Proc,

Workshop, 26 March-5 April 1984. Int. Rice Res. Inst. Los Banos, Laguna, Philippines, pp 71-89

Puslittanak (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat). 2000. Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia Skala 1: 1.000.000,- Badan Litbang Pertanian.

Puslitbangtanak (Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat). 2001. Atlas Arahan Tata Ruang Pertanian Indonesia, Skala 1: 1.000.000.

Reeves, G. 1998. Sustainable Intensification of Agriculture. Int. Maize and Wheat Improvement Center

Salisbury, F. B. and C. Ross. 1969. Plant Physiology. Wadsworth Pub. Co. Inc., Belmont, California, 747 p.

Schwab, G. O. 1966. Soil and Water Conservation Engineering (2nd edition). John Wiley & Sons Inc. New York, 623 p.

Setyanto, P., A.B. Rosenani, M.J. Khanif, C.I. Fauziah and R. Boer. 2004. Methane emission and its mitigation in rice field under different management practices in Central Java. Ph.D Thesis, Universiti Putra Malaysia.

Shihua, C., S. Zongxiu and S. Huamin. 1991. Simulation of the effect of temperature on spikelet fertility in rice and its consequences for rice production. In. F.W.T. Penning de Vries et al (eds.). Simulation and systems analysis for rice production (SARP). Pudoc, Wageningen. p. 73-78.

Soepraptohardjo, H and H. Suhadjo 1978. Rice Soils of Indonesia. In Soil & Rice. IRRI, Los Banos, Philippines pp 9-113.

Syam, M. 2008. Padi Organik dan Tuntutan Peningkatan Produksi Beras. Iptek Tanaman Pangan Vol. 3 (1), April 2008 pp 1-8.

Tisdale, S. and W. Nelson. 1975. Soil Fertility and Fertilizer. Collier Macmillan Int. Edition, 694 p.

White, A., P. Handler and E.L. Smith. 1975. Principles of Biochemistry. Philippines Copyright by Mc Graw-Hill, Int. First Published, 853 p.

Wihardjaka, A dan P. Setyanto. 2007. Emisi dan Mitigasi Gas Rumah Kaca dari Lahan Sawah Irigasi dan Tadah Hujan. Dalam Pengelolaan Lingkungan Pertanian Menuju Mekanisme Pembangunan Bersih. Balai Penelitian Linkungan Pertanian (Balingtan), hal. 55-87.

World Bank. 1982. Indonesia: Review of Irrigation Sector Work Program: An Issue Paper. World Bank, Washington D.C., USA, Zop (C9725/J1030445/ D 3632/44).

Yoshida, S. 1981. Fundamental of rice crops science. IRRI, Los Banos, the Philippines. 269 halaman.

Peraturan Menteri Pertanian
Nomor: 40/ Permentan/OT.140/4/2007
Tanggal 11 April 2007

Tentang

REKOMENDASI PEMUPUKAN N, P, DAN K PADA PADI SAWAH SPESIFIK LOKASI

DEPARTEMEN PERTANIAN
Jakarta, April 2007

Lampiran 1.
Contoh rekomendasi pemupukan N, P, K spesifik lokasi (kecamatan) pada padi sawah di Jawa Barat (Cirebon, Depok), Permentan No. 40, 2007.

Provinsi/ Kabupaten	Kecamatan	Acuan rekomendasi pupuk (kg/ha								
		Tanpa bahan organik			5 ton jerami/ha			2 ton pupuk kandang/ha		
		Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl
Jawa Barat	1. Cirebon Utara	300	50	50	280	50	0	275	0	30
Cirebon	2. Cirebon Barat	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	3. Cirebon Selatan	300	50	100*	280	50	50*	275	0	80*
	4. Beber	300	50	100*	280	50	50*	275	0	80*
	5. Weru	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	6. Plumbon	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	7. Klangenan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	8. Palimanan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	9. Arjarwinangun	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	10. Gegesik	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	11. Kapetakan	300	75*	50	280	75*	0	275	25*	30
	12. Astanajapura	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	13. Lemahabang	300	50	100*	280	50	50*	275	0	80*
	14. Karangsembung	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	15. Waled	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	16. Ciledug	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	17. Babakan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	18. Losari	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	19. Pabelian	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	20. Gebang	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	21. Susukan Lebak	300	50	100*	280	50	50*	275	0	80*
	22. Sedong	300	50	100*	280	50	50*	275	0	80*
	23. Pangenan	300	50	50	280	50	0	275	0	30

Lampiran 1. Lanjutan.

Provinsi/ Kabupaten	Kecamatan	Acuan rekomendasi pupuk (kg/ha								
		Tanpa bahan organik			5 ton jerami/ha			2 ton pupuk kandang/ha		
		Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl
	24. Mundu	300	75	50	280	50	0	275	25	30
	25. Cirebon Utara	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	26. Sumber	300	75	50	280	50	0	275	25	30
	27. Dukuputang	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	28. Depok	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	29.Pangurangan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	30. Ciwaringin	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	31. Susukan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
Jawa Barat	1. Harjamukti	300	50	50	280	50	0	275	0	30
Kodya	2. Lemagduwur	300	50	50	280	50	0	275	0	30
Cirebon	3. Pekalipan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	4. Kesambi	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	5. Kejaksan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
Jawa Barat	1. Sawangan	300	75	100	280	75	50	275	25	80
Kodya	2. Pancoran Mas	300	75	100	280	75	50	275	25	80
Depok	3. Cimanggis	300	75	100	280	75	50	275	25	80
	4. Beji	300	75	100	280	75	50	275	25	80
	5. Limo	300	75	100	280	75	50	275	25	80

- : Luas hamparan sawah kurang dari 250 ha pada peta skala 1;250.000
- : Takaran pupuk actual dapat lebih rendah karena variabilitas hara tanah

Gunakan BWD, PUTS atau Petak Omisi untuk menentukan takaran pupuk N, P, dan K lebih pada terpetakan

Menteri Pertanian,

Anton Apriyantono

Lampiran 2.
Contoh rekomendasi pemupukan N, P, K spesifik lokasi (kecamatan) pada padi sawah di Jawa Tengah (Semarang, Salatiga, Kudus), Permentan No. 40, 2007.

Provinsi/ Kabupaten	Kecamatan	Acuan rekomendasi pupuk (kg/ha								
		Tanpa bahan organik			5 ton jerami/ha			2 ton pupuk kandang/ha		
		Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl
Jawa Tengah/ Semarang	1. Getesan	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	2. Tengaran	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	3. Susukan	300	100+	50	280	100+	0	275	50+	30
	4. Kaliwungu	-	_	-	-	-	-	-	-	-
	5. Suruh	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	6. Pabelan	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	7. Tutang	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	8. Banyubiru	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	9. Jambu	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	10. Somowono	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	11. Ambarawa	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	12. Bawen	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	13. Bringin	300	75+	50	280	75+	0	275	25+	30
	14. Bancak	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15. Bergas	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	16. Pringapus	350	75	50	330	75	0	325	25	30
	17. Ungaran	350	75*	50	330	75*	0	325	25+	30

Lampiran 2. Lanjutan.

Provinsi/ Kabupaten	Kecamatan	Acuan rekomendasi pupuk (kg/ha								
		Tanpa bahan organik			5 ton jerami/ha			2 ton pupuk kandang/ha		
		Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl
Jawa Tengah/ Kota Salatiga	1. Agromulyo	350	50	50	330	50	0	325	0	30
	2. Tingkir	350	50	50	330	50	0	325	0	30
	3. Sidomukti	350	50	50	330	50	0	325	0	30
	4. Sidorejo	350	50	50	330	50	0	325	0	30
Jawa Tengah/ Kudus	1. Kaliwungu	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	2. Kota Kudus	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	3. Jati	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	4. Undaan	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	5. Mejobo	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	6. Jekulo	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	7. Bae	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	8. Gebog	300	50	50	280	50	0	275	0	30
	9. Dawe	300	50	50	280	50	0	275	0	30

- : Luas hamparan sawah kurang dari 250 ha pada peta skala 1;250.000
- : Takaran pupuk actual dapat lebih rendah karena variabilitas hara tanah

Gunakan BWD, PUTS atau Petak Omisi untuk menentukan takaran pupuk N, P, dan K lebih pada terpetakan

Menteri Pertanian,

Anton Apriyantono

Lampiran 3.
Contoh rekomendasi pemupukan N, P, K spesifik lokasi (kecamatan) pada padi sawah di Jawa Timur (Gresik), Permentan No. 40, 2007.

Provinsi/ Kabupaten	Kecamatan	Acuan rekomendasi pupuk (kg/ha								
		Tanpa bahan organik			5 ton jerami/ha			2 ton pupuk kandang/ha		
		Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl	Urea	SP-36	KCl
Jawa Timur/ Gresik	1. Wringin anom	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	2. Driyorejo	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	3. Kedamean	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	4. Balong Panggang	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	5. Benjeng	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	6. Menganti	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	7. Cerme	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	8. Duduk Sampeyan	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	9. Kebomas	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	10. Gresik	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	11. Manyar	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	12. Bungah	300	75	50	280	75	0	275	25	30
	13. Sidayu	300	50	50	280	50	0	275	25	30
	14. Dukun	300	100+	50	280	100+	0	275	25	30
	15. Panceng	250	100+	50	230	100+	0	275	25	30
	16. Ujung Pangkah	250	100	50	230	100	0	275	25	30
	17. Sangkapura	300	100	50	280	100	0	275	25	30
	18. Tambak	300	75	50	280	75	0	275	25	30

- : Luas hamparan sawah kurang dari 250 ha pada peta skala 1;250.000
- : Takaran pupuk aktual dapat lebih rendah karena variabilitas hara tanah

Gunakan BWD, PUTS atau Petak Omisi untuk menentukan takaran pupuk N, P, dan K lebih pada terpetakan

Menteri Pertanian,

Anton Apriyantono

Lampiran 4.

Kini petani bisa memperoleh rekomendasi pemupukan padi sawahnya dengan mudah dan cepat melalui SMS

PHSL-HP

Rekomendasi Pemupukan Hara Spesifik Lokasi Melalui HP

Tersedia dalam Bahasa Indonesia, Jawa, Sunda, Bali, dan Bugis

Kontak nomor bebas pulsa

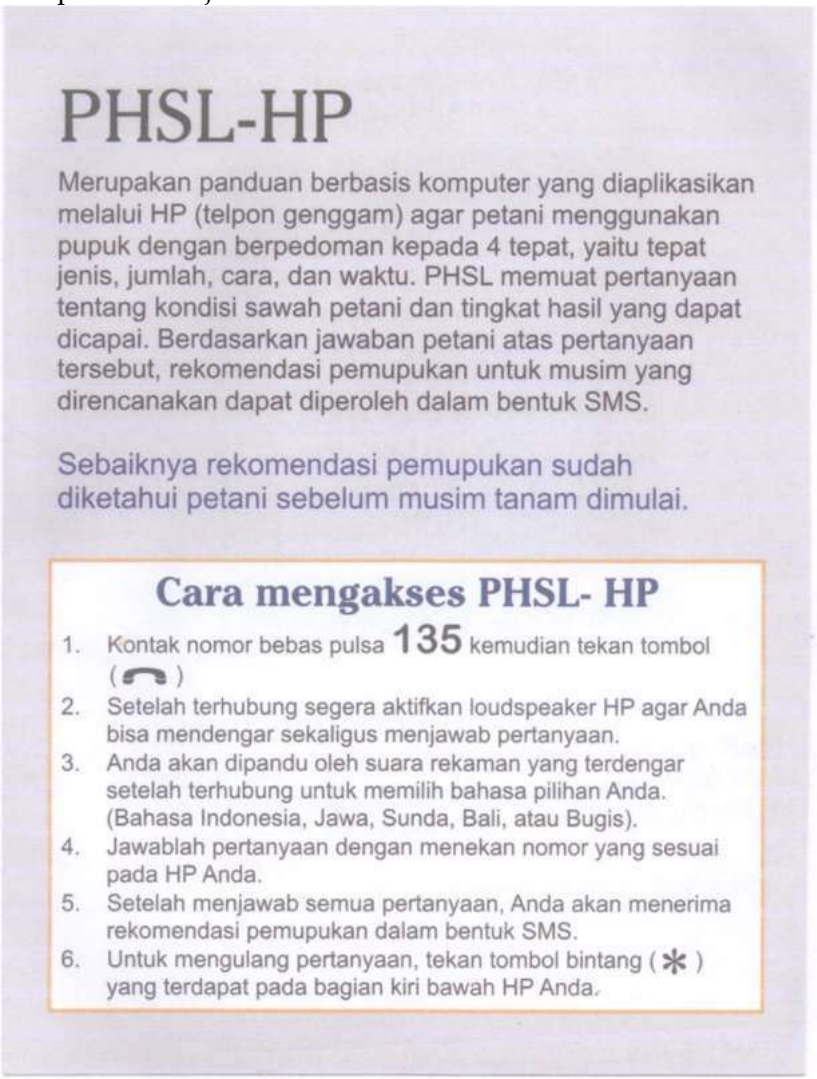
135

lalu ikuti petunjuk yang ada di HP

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
International Rice Research Institute
IRRI

…. Dilanjutkan…

Lampiran 4. Lanjutan.



PHSL-HP

Merupakan panduan berbasis komputer yang diaplikasikan melalui HP (telpon genggam) agar petani menggunakan pupuk dengan berpedoman kepada 4 tepat, yaitu tepat jenis, jumlah, cara, dan waktu. PHSL memuat pertanyaan tentang kondisi sawah petani dan tingkat hasil yang dapat dicapai. Berdasarkan jawaban petani atas pertanyaan tersebut, rekomendasi pemupukan untuk musim yang direncanakan dapat diperoleh dalam bentuk SMS.

Sebaiknya rekomendasi pemupukan sudah diketahui petani sebelum musim tanam dimulai.

Cara mengakses PHSL- HP

1. Kontak nomor bebas pulsa **135** kemudian tekan tombol ( )
2. Setelah terhubung segera aktifkan loudspeaker HP agar Anda bisa mendengar sekaligus menjawab pertanyaan.
3. Anda akan dipandu oleh suara rekaman yang terdengar setelah terhubung untuk memilih bahasa pilihan Anda. (Bahasa Indonesia, Jawa, Sunda, Bali, atau Bugis).
4. Jawablah pertanyaan dengan menekan nomor yang sesuai pada HP Anda.
5. Setelah menjawab semua pertanyaan, Anda akan menerima rekomendasi pemupukan dalam bentuk SMS.
6. Untuk mengulang pertanyaan, tekan tombol bintang (*) yang terdapat pada bagian kiri bawah HP Anda.

…. Dilanjutkan…

Lampiran 4. Lanjutan

Contoh isi SMS rekomendasi pupuk yang terlihat pada monitor HP Anda:

Pertanyaan pada PHSL-HP

Pilihan bahasa : Bahasa Indonesia tekan angka ①; Boso Jawi pilih ongko kalih ②; Basa Sunda pencet nomer tilu ③; Base Bali pencet angko papat ④; Basa Ugi ta pesse'i nomoro lima ⑤.

1. Jika sawah Anda di Jawa atau Bali tekan angka ①; Jika tidak, tekan angka ②.

…. Dilanjutkan…

Lampiran 4. Lanjutan

2. Pilih luas sawah yang akan Anda pupuk antara 0,1 sampai 0,5 hektar. Jika lebih dari 0,5 hektar, pilih salah satu ukuran berikut lalu kalikan sehingga sesuai dengan luas sawah Anda. Tekan angka: ① Jika luas sawah sekitar 0,1 ha; ② sekitar 0,2 ha; ③ sekitar 0,3 ha; ④ sekitar 0,4 ha; ⑤ sekitar 0,5 ha.
3. Pilih musim tanam yang akan dilaksanakan Jika musim hujan, tekan angka ①; jika musim kemarau, tekan angka ②.

4a. Di Jawa dan Bali: Pada musim hujan/kemarau, berapa biasanya hasil gabah kering panen sebelum dipotong bawon. Tekan angka: ① jika sekitar 5 t/ha; ② sekitar 6 t/ha; ③ sekitar 7 t/ha; ④ sekitar 8 t/ha; ⑤ sekitar 9 ton atau lebih per hektar.

4b. Di luar Jawa dan Bali: : Pada musim hujan/kemarau, berapa biasanya hasil gabah kering panen sebelum dipotong bawon. Tekan angka: ① jika sekitar 4 t/ha; ② sekitar 5 t/ha; ③ sekitar 6 t/ha; ④ sekitar 7 t/ha; ⑤ sekitar 8 ton atau lebih per hektar.

5. Pilih pupuk yang akan digunakan, tekan angka:
   ① Jika menggunakan pupuk phonska;
   ② Pelangi;
   ③ Kujang.

Penggunaan PHSL-HP hanya efektif bila:

- Sawah terletak di dataran rendah
- Pola tanam petani dua kali padi sawah per tahun
- Umur bibit pada tanam pindah adalah sekitar 21 hari
- Varietas yang ditanam adalah non-hibrida yang berumur relatif sama dengan IR64 atau Ciherang
- Sisa tunggul jerami 25 cm.

INDEKS

A

abiotik 2
aerasi 14
absorpsi 45
adhesuif 35
air tanah 28
agroecosystem properties 8
aksidifikasi 156
aliran massal 162
alkalintas 46
ameliorasi 83, 84
analisis tanah 85
analisi pertumbuhan 99
analisis KTK 43
anorganik 5, 12, 14, 17
apparent spesifik volume (ASV) 93. 94
atlas 98

B

bahan induk 24
bahan organik 76, 92
B/C ratio 11, 55, 56
bantuan metamorf 24, 25
bantuan induk 22
berat jenis partikal tanah 32
biofisik 109
biologi 105
biotik 2
bray's nutrient mobility concept 121

C

cathment area 86
cekaman air 9
CGAIR 97, 98

collector-drainage (dam-parit) 82
control section 23, 27, 31
covalent bonding 39
cytochrome 165
cytochrome pump 165

D

dam parit 82
DAS 53, 55, 97
daya pegang air dari tanah 42
denitrifikasi 73, 74, 75, 76
dekomposisi 41, 76
densitas partikel 93
determinasi 43
difusi 160
diversifkasi 94
drainase 28, 31, 87, 88

E

ecological farming 2, 3, 7
efisiensi 7, 16, 96, 97
ekosentris 3, 5
eko-antroposentris 5, 8
ekoreginal 98
ekstraktan uji tanah 185
eguilibrium 161
eguitabilitas 9
EL Nino 89
embung 88
emisi GRK 16,92
endapan beku 24
EPL 17, 18, 19
EPUH 16, 17, 18, 19
eradikasi 51, 53
erosi 2, 15, 20, 52, 88
evaporasi 45
evapotranspirasi 87

F

factorial treatment 109, 110
factorial 104, 110
faktor konversi unsur hara 152
faktor jerapan hara 166
family 60
fisik (tanah) 15, 42, 105
fiksasi 15
fluktuasi 31

G

gogorancah 89
granulasi 42
great soil group 59, 60
GRK (gas rumah kaca) 90
ground water soil 69

H

hara makro/mikro 15
higroskopisitas 154
horizon 24, 79
humus 41

I

ICM (PTT) 15
indeks hasil 154
indeks kegaraman 24, 79
INSFFER 118
infrastruktur 96
irigasi 96
- irigasi bergilir 88, 96
- irigasi sedehana (pedesaan) 86
irreversible 79
ISNAR 97
infensifikasi 94
infrusi 51
INRM 98
interpretasi uji tanah 186

inferaksi komplemenen (saling menguntungkan) 108

J

jerosit 80
Jenis pupuk 12,122
Jerapan hara 159, 160
- jerapan pasif 160
- jerapan aktif 163

K

kapasitas lapang 38
katagori 65
keanekaragaman hayati 22
kebutuhan kapur 187
kehalusan butiran 153
kejenuhan basa 48
kemerataan 9
keberlanjutan (sustainability) 8
kemasaman 46
klasifikasi jenis tanah 70, 45, 58
KISS 6
konservasi 2, 28, 54, 87
konsistensi 23, 35, 36
kesesuaian lahan 29, 30, 115
kohesif 35
koloid 36, 41
konsentrasi 45
konkresi 23
kosep mobiltas hara 102
kosep baule unit 102, 103
konsep “carrier” 163
KTK 14, 36, 56, 90, 107
kualitas kapur 93

L

land 6,9
LCC (leaf color chart) 118
La Nina 89

leaching 14
LISA 1,8
logam berat 16

M

marginal 17
microcell (micelle) 37
mega project 105, 118
mikro arganisme 41, 92
mineralisasi 13
MOL 3
morfologi tanah 69
mother trial 110
muatan permanen 39

N

net return 18
netralitas 46,73
netralisasi 75, 76
night soil 16
NGO 1
nitrifikasi 75, 76
nucleus site 110

O

oksidasi 69, 80, 89
oksidasi-reduksi 92
organik 12, 14, 15, 17, 27, 40, 41, 42, 76
organik farming 1, 16
outflow control 82

P

paddy soil 70
paket teknologi 17
pasang-surut 78
partial efficiency concept 117, 118

pedon 23, 24
pelandaian produksi 1
PLG 76
PHT 3
pH tanah 45, 90, 107
PHSL 119
Perhitungan keuntungan 180
Penarikan hara oleh cytochrome 165
Pemupukan berimbang 104
peraturan menteri pertanian no. 40 119
pertanian presisi 17, 65
pertanian preskriptif 65
petak omosi 120
pori-pori tanah 32, 73
polusi 15
porositan 14
potensi 19, 113
PTT 2, 3, 4, 8, 106, 121
profil 23, 24, 68
pupuk mikro 84

R

ratio C/N 42
rawa lebak 82
rawa pasang-surut (rice constaint study) 99
reduksi 69, 89
redox potential 70, 92, 94
regim air 72
regolith 27
relay cropping 89
reformasi agrarian 6
relief 22, 26, 52
revolusi hijau 1, 3
rotational cropping 89
rumus Mitscherlich 99
rumus Spil'lman 100
run off water 86

S

salinitas 28, 29, 30, 49
SCU 158
segitiga tesktur 34
senjang hasil 9, 11, 12, 109, 111, 112
series (tanah) 60, 114
soil solution 27
solum 24
soil fatigue 1
soil mocsture regime 108
soil sickness 1
slickensiole 61
SRI 2, 3, 4
SSNM 115, 117
spesifik lokasi 119
stability 9
stress day 108
standar pupuk 149
struktur tanah 91
sub-group 60
submergence 70
sustainability 5, 6, 7, 8, 55, 93

T

tadah hujan 86, 87
taksa (taxa) 65
tanah 21
tekstur 23, 33, 56
tipe luapan 76,77
tipologi lahan 77, 78, 81, 83
topografi 28, 86
toposeguen 68
tubuh tanah 23, 24
tukar menukar ion (hara) 161

U

uji tanah 183
unsur hara penting 47
unsur makro 47
unsur mikro 47
USG 118
USLE 53

V

viabilitas ekonomi 17
void 23
volatilisasi 15, 74, 76

W

walik jerami 88
water logged 68
water potential 69
water retention 79
water table 31
wathering proses 27

Z

zanasi; contoh 82
- zanasi system usahatani
- zanasi komoditas pertanian

DATA PENULIS

ACHMAD MUDZAKKIR FAGI: Lahir di Sumenep, Madura pada 09 Juli 1940 dari keluarga petani dan pedagang di lingkungan santri. Gelar BS (Sarjana Muda) diperoleh dari Akademi Pertanian, Ciawi, Bogor pada tahun 1962. Pada tahun 1974 mendapat beasiswa dari USAID melalui IRRI (International Rice Research Institue) untuk mengikuti program MSc dan PhD dari University of the Philipines at Los Banos. Gelar PhD dicapai pada tahun 1980.

Sekembalinya dari Filipina penulis bergabung dengan Balai Penelitian Tanaman Pangan Sukamandi (Balittan Sukamandi) dan memimpin Balittan ini pada periode 1988-1994, kemudian ditugasi untuk memimpin Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (Puslitbangtan) pada periode 1995-1998; terakhir ditunjuk sebagai Sekretaris Badan Litbang Pertanian pada periode 1999-2000.

Setelah menyelesaikan tugas sebagai Sekretaris Badan Litbang Pertanian, Penulis bergabung dengan Tim Anjak (Analisis Kebijakan), di Badan Litbang Pertanian dan di Puslitbangtan. Anggota Tim Anjak Badan Litbang Pertanian ialah Dr. Faisal Kasryno, Dr. Effendy Pasandaran dan Dr. Erwidodo.

Keanggotaan dan kegiatan dalam organisasi profesional non-struktural baik yang bertaraf nasional maupun internasional yang lintas dispilin ilmu dari tahun 1980-an sampai 2000-an memperkaya wawasan penulis bukan hanya yang berkaitan dengan *soil, crop and water sciences*, tetapi juga dalam disiplin ilmu sosial, ekonomi dan kelembagaan. Semua itu penulis peroleh karena berstatus pegawai negeri sipil (peneliti) pada

Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian. Organisasi non-struktural dimana penulis berpartisipasi, adalah:

- Nasional = anggota Dewan Riset Nasional, anggota Kelompok Kerja Ahli Dewan Ketahanan Pangan Nasional, pengurus PERHIMPI (Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia), pengurus YAPADI (Yayasan Padi Indonesia, anggota Tim Evaluator Ijazah S2/S3 (luar negeri).
- Internasional = *Global Steering Committee of Alternative Slash and Burn* (ICRAF), anggota IRRI *Board of Trustees* (IRRI), koordinator *farming sistem research* (FAO) di Indonesia, *principle scientist* penelitian emisi gas rumah kaca (IRRI-UNDP), penanggung jawab penelitian ABSP (*Agricultural Biotechnology for Suistainable Productivity* (Michigan State University), konsultan kegiatan CIIFAD di Filipina (Cornell University), konsultan/evaluator penelitian tikus ACIAR di CSRIO (Australia), Indonesia, Thailand, Laos, Vietnam dan Philippines (IRRI), anggota Technical Advisory Board for FFBB, USA.

Abdul Karim Makarim, Lahir di Bogor pada 5 Februari, 1950. Masuk IPB Fakultas Pertanian tahun 1969 dan lulus S1 tahun 1975. Penelitian untuk tesisnya bidang Ilmu Kesuburan Tanah, berjudul "Penetapan Dosis P pupuk berdasarkan Ciri P tanah sawah" merupakan dasar pemupukan spesifik lokasi. Selanjutnya bekerja di LP3 (sekarang bernama Puslitbang Tanaman Pangan). Gelar S2 (MSc) dan S3 (PhD) bidang Ilmu Tanah (*soil sciences*) diperoleh dari North Caroline State University, Raleigh USA masing-masing pada tahun 1982 dan 1986.

Pengalaman training (1) tahun 1977 mendapat training tentang Hara Tanaman (aplikasi N isotop dalam memonitor serapan hara N oleh tanaman padi) di Hokuriku Nat Agr.Exp.Sta., Niigata, Japan selama 6 bulan. (2) *System Analysis* dan Crop Modeling di IRRI, Los Banos, Filipina pada tahun 1988; di IFDC, Alabama, U.S.A, pada tahun 1989; dan di CABO-DLO Wageningen, Belanda, 1991; (3) Pengukuran Emisi Gas Metan dari lahan sawah di IRRI, Los Banos, Philippines pada tahun 1993.

Riwayat pekerjaan: Ketua Kelti Eko-Fisiologi, di Balai Penelitian Tanaman Pangan Bogor (Balittan Bogor) pada tahun 1990-1995; Pangkat tertinggi dalam pekerjaannya adalah Ahli Peneliti Utama bidang Fisiologi Tanaman; sejak tahun 1998; dan memperoleh gelar Profesor Riset di bidang Fisiologi Tanaman dan Ilmu Tanah dari Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) pada 25 Juni 2007.

Pengalaman Penelitian (1) Penelitian pada lahan-lahan bermasalah: rawa pasang surut dan lahan sawah bukaan baru serta lahan kering beriklim kering; (2); menjadi *Project Scientist* di IRRI Los Banos, Filipina tahun 2000-2002; (3) Ketua Tim Ahli pada Pilot Proyek Pengembangan Padi Indonesia di Daerah Savana Sudan pada tahun 2012-2013.

Karya Tulis Ilmiah yang telah dipublikasikan dalam dan luar negeri lebih dari 150 tulisan dan telah menghasilkan 5 (lima) hak paten berupa Sistem Pakar Budidaya Tanaman Pangan. Atas karyanya ini ia telah memperoleh penghargaan Anugerah Kekayaan Intelektual Luar Biasa (AKIL) pada tahun 2010 dari lima kementerian Diknas, Ristek, Hukum & Ham, Perdagangan dan Pertanian.

HARIS SYAHBUDDIN: Lahir di Teluk Betung, Lampung, pada 15 April 1968. Menekuni pekerjaan dengan bidang keahlian Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan. Gelar S1 diperoleh dari Universitas Lampung, di bidang Ilmu Tanah tahun 1990, mengikuti program S2 di Ecole Nationale de Meteorogique, Toulouse bidang Tropical Meteorology di Perancis tahun 2001, dan S3 diperoleh dari Kobe University, Jepang jurusan Earth System Science.

Pengalaman training tentang Workshop on Modeling the Impact of Global Change di Bogor tahun 1997. Mengikuti Workshop on Assessing the Potential of Rice maize System in asia yang diselenggarakan IRRI Philipina tahun 2006 dan Global Climate Change Adaptation in Rice System Production in South East Asia tahun 2007.

Riwayat pekerjaan diawali sebagai Kasie Pelayanan Teknis tahun 2002 di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi; Kasubbid Evaluasi tahun 2007 di Puslitbang Perkebunan; Kepala BPTP Maluku Utara tahun 2008; Kepala Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa tahun 2011; Kepala Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi tahun 2012; Kepala balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian tahun 2016; dan Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan tahun 2019-sekarang.

Mendapat penghargaan Inovasi Pangan dan Pertanian dari Menteri Pertanian pada tahun 2015.