

PENGELOLAAN HARA MINERAL TANAMAN PADI

Diah Setyorini¹ dan Sarlan Abdulrachman²

¹Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Lahan Pertanian

²Balai Besar Penelitian Tanaman Padi

1. PENDAHULUAN

Padi adalah tanaman unik karena dapat tumbuh dalam keadaan tergenang maupun pada tanah kering. Dinamika hara pada kedua ekosistem tersebut sangat berbeda. Ketersediaan air yang cukup merupakan keuntungan bagi pertumbuhan padi sawah. Produksi padi yang tidak stabil pada lahan sawah tadah hujan dan lahan kering sering kali disebabkan oleh kekurangan air. Penggenangan menyebabkan tanah dalam keadaan reduksi, oksigen menjadi kurang, pertukaran gas antara udara dan tanah terganggu, karbondioksida, asam organik, metan, dan molekul hidrogen meningkat. Untuk mengatasi kekurangan oksigen, tanaman padi mempunyai jaringan khusus berupa rongga-rongga udara (*parenchyma*), di mana udara dapat diangkut dari pucuk ke akar. Dengan demikian, keterbatasan fungsi akar karena keadaan anaerobik dapat diatasi.

Pembentukan tanah sawah dapat dibedakan menjadi dua, yaitu yang berasal dari tanah kering yang kemudian diairi dan disawahkan, dan yang berasal dari tanah basah seperti rawa pasang surut yang kemudian dikeringkan dengan membuat saluran-saluran drainase untuk mengendalikan air pasang surut (Hardjowigeno dkk., 2004).

Pencetakan lahan sawah baru yang berasal dari tanah kering menyebabkan perubahan sifat morfologi dan fisiko kimia secara permanen. Perataan tanah, penggenangan, pembajakan, penggaruan, dan pembuatan pematang sawah menyebabkan terjadinya perubahan dari tanah asal menjadi tanah yang baru. Bila tanah tersebut berasal dari tanah rawa pasang surut, maka perubahan yang terjadi relatif tidak tampak.

Dalam keadaan tergenang, semua hara berada dalam bentuk tereduksi. Nitrogen yang pada kondisi aerob diserap tanaman dalam bentuk nitrat, pada kondisi tergenang diserap dalam bentuk ion amonium. Penggenangan menyebabkan fosfat lebih tersedia. Oleh sebab itu, pemupukan fosfat pada padi sawah tidak sepenting pada padi gogo dan palawija. Penggenangan juga meningkatkan ketersediaan kalium, besi, mangan, dan silikon. Demikian pula kadar besi fero (Fe^{2+}) justru kadang-kadang berlebihan, yang menyebabkan keracunan pada tanaman padi. Sebaliknya, ketersediaan belerang dan seng

menurun. Penggenangan juga menekan pertumbuhan gulma. Dalam keadaan tanah kering, gulma sering kali merupakan kendala produksi dan bersaing dengan tanaman padi dalam mendapatkan sinar matahari, air, karbondioksida, oksigen, dan unsur hara.

Tulisan ini membahas tentang proses perkembangan lahan sawah yang bersifat temporer dan permanen yang berpengaruh terhadap penyediaan hara bagi tanaman. Diulas pula kebutuhan hara serta batas keracunan hara tanaman padi serta konsep efisiensi pemupukan untuk peningkatan produktivitas tanah dan tanaman.

2. PROSES PERKEMBANGAN LAHAN SAWAH

2.1 Perubahan Temporer

Pengolahan tanah untuk padi bergantung pada cara penanaman yang akan diterapkan dan ketersediaan air. Penentuan saat pengolahan tanah yang tepat bergantung pada kelembapan tanah, karena konsistensi tanah berubah sesuai kelembapan. Pengolahan tanah bertujuan untuk menyediakan lingkungan tumbuh yang baik bagi tanaman padi, sejak stadia awal vegetatif hingga menjelang panen, serta memperbesar daya simpan air dalam lapisan olah sehingga mencegah terjadinya aliran permukaan. Secara umum, pengolahan tanah bermanfaat untuk: (1) mencegah pertumbuhan gulma, (2) menyediakan media tumbuh yang optimal bagi pertumbuhan tanaman, (3) meningkatkan porositas dan aerasi tanah, (4) menghancurkan partikel tanah menjadi lebih halus sehingga penyerapan unsur hara lebih optimal (De Datta, 1981).

Pengolahan tanah pada lahan sawah terdiri atas pembajakan dan pelumpuran. Pada tahap ini, tingkat (rezim) kelembapan tanah sangat menentukan cara pengolahan tanah yang tepat. Tanah dengan rezim kelembapan aquic tidak perlu diolah dengan pelumpuran karena ketersediaan air pada tanah-tanah ini tergolong tinggi sepanjang tahun (Eswaran, 1985; Sharma dan De Datta, 1985). Pengolahan tanah pada lahan sawah terdiri atas tiga fase, yaitu (1) merendam tanah hingga jenuh air, (2) membajak tanah, dan (3) menggaru sehingga bongkahan tanah hancur dan digenangi.

2.1.1 Pelumpuran

Pelumpuran diartikan sebagai penghancuran agregat tanah pada kondisi jenuh air menjadi partikel yang lebih halus. Proses ini merupakan proses mekanis untuk mengurangi volume tanah. Tekstur dan struktur tanah, jenis mineral liat, kadar bahan organik, oksida dan sesquiodksida Al dan Fe akan menentukan pengaruh pelumpuran terhadap sifat fisik tanah.

Tujuan pelumpuran adalah menyediakan media tumbuh yang baik bagi tanaman padi yang ditanam dengan cara pindah (*transplanting*), menekan pertumbuhan gulma, dan meningkatkan ketersediaan hara. Dalam proses ini terjadi perubahan sifat fisik kimia tanah yang nyata dan berkaitan dengan penurunan jumlah pori makro, porositas, bobot isi, konduktivitas hidraulik, meningkatkan kemampuan tanah menahan air, dan perubahan biogeokimia tanah yang mengarah pada peningkatan ketersediaan hara (De Datta, 1981; Prihar dkk., 1985).

Proses pelumpuran akan menghancurkan agregat tanah. Pada kondisi tanah jenuh air dan tergenang, agregat tanah akan terdispersi menjadi partikel yang lebih kecil. Menurut Chaudhary dan Ghildyal (1969), pelumpuran menghancurkan 40% agregat tanah menjadi fraksi tanah berukuran $<0,05$ mm. Pada tanah yang bagian atasnya bertekstur halus, proses pelumpuran cepat menutup ruang pori di bawah lapisan olah. Kondisi ini akan mempercepat terbentuknya lapisan tapak bajak yang kedap (*plowpan*) yang mempunyai permeabilitas lambat. Terbentuknya lapisan tapak bajak sangat penting untuk sawah irigasi agar penggunaan air lebih efisien. Tanah dengan lapisan atas yang kasar sulit membentuk lapis tapak bajak sehingga penggunaan air tidak efisien karena hilang melalui perkolasi yang cepat (Prasetyo dkk., 2004).

Pelumpuran meningkatkan kemampuan tanah meretensi air, terutama pada tanah yang didominasi oleh mineral liat tipe 2:1. Namun, pada tanah yang didominasi mineral liat 1:1 kemampuan meretensi air lebih rendah (Prihar *et al.*, 1975). Pada tanah yang mengembang mengerut seperti Vertisol (liat tipe 2:1), kondisi kering yang cukup lama akan membuat tanah retak atau pecah-pecah. Pada saat tanah digenangi kembali, retakan tidak dapat menutup sempurna sehingga dapat menyebabkan kehilangan air dan unsur hara melalui perkolasi.

Tanah sawah yang dilumpurkan menekan kehilangan air melalui perkolasi sekitar 20%–30% dibandingkan dengan tanah sawah yang tidak mengalami proses pelumpuran. De Datta dan Kerim (1974) melaporkan bahwa tanah yang tidak dilumpurkan membutuhkan air dua kali lebih banyak, namun mengalami kehilangan air melalui rembesan (*seepage*) dan perkolasi tiga kali lebih banyak dari tanah yang dilumpurkan. Pelumpuran mengurangi kehilangan air melalui perkolasi sebagai akibat menurunnya daya kohesi antaragregat tanah sehingga mengurangi pori makro dan meningkatkan berat jenis tanah (Wickman dan Singh, 1978).

Pengolahan tanah dengan pelumpuran memengaruhi bobot isi (*bulk density*) tanah. Subagyono dkk. (2001) menyatakan bahwa pelumpuran menurunkan bobot isi tanah bertekstur liat, liat berdebu, dan lempung berliat masing-masing sebesar 11%, 16%, dan 10%. Pelumpuran kedua kalinya pada tanah bertekstur lempung liat berpasir menyebabkan bobot isi menurun hingga 26% dibandingkan dengan jika tanah tidak dilumpurkan. Menurut Ghildyal (1978),

pelumpuran pada tanah dengan agregat yang mantap dan porus menghasilkan agregat yang masif dengan bobot isi meningkat.

Tanah yang dilumpurkan memiliki ketahanan penetrasi akar yang rendah di lapisan atas dan meningkat di lapisan bawah. Kondisi ini diakibatkan oleh tingginya kandungan air akibat pelumpuran. Menurut Subagyono (2001), ketahanan penetrasi tanah bagian atas (0 cm–25 cm) yang dilumpurkan lebih rendah dibandingkan dengan tanah yang tidak dilumpurkan sehingga memudahkan perkembangan tanaman akar padi. Sharma dan De Datta (1985) melaporkan bahwa penurunan ketahanan penetrasi tanah pada 0 cm–10 cm dari 11 Mpa menjadi 0 Mpa dapat meningkatkan hasil dari 3,6 t menjadi 5,5 t/ha.

Hancurnya agregat tanah akibat pengolahan tanah dengan pelumpuran menyebabkan porositas dan distribusi ruang pori terganggu sehingga menurunkan kemampuan tanah melewatkan air (permeabilitas). Semakin tinggi intensitas pengolahan tanah semakin besar kerusakan agregat besar (Prasetyo dkk., 2004).

Tanah sawah yang dilumpurkan mempunyai kemampuan menahan atau menyimpan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang tidak dilumpurkan. Hancurnya agregat tanah menyebabkan penurunan ruang pori makro berukuran $>30\text{ }\mu\text{m}$ hingga 83% dan meningkatkan pori mikro berukuran $0,6\text{ }\mu\text{m}$ – $30\text{ }\mu\text{m}$ dan $<6\text{ }\mu\text{m}$ hingga 7% dan 52%. Kondisi ini meningkatkan air yang tertahan di dalam ruang pori mikro.

Proses pelumpuran akan maksimum jika kondisi kadar air tanah berada di antara kapasitas lapang dan jenuh air (Sharma dan De Datta, 1985). Pada kondisi kelembapan seperti ini, daya kohesi di dalam agregat tanah minimum sehingga bidang geser mudah terbentuk. Bila kelembapan di bawah titik jenuh maka daya kohesi di antara agregat tanah dalam suatu gumpalan tanah akan maksimum. Akibatnya, energi yang dibutuhkan untuk melumpurkan tanah akan lebih besar. Tanah yang kaya akan oksida Fe, Al, kalsium karbonat, dan bahan organik yang berperan sebagai bahan pemantap agregat memerlukan input energi yang lebih besar untuk proses pelumpuran. Tanah-tanah yang mengandung mineral liat kaolinitik 1:1 lebih sulit dilumpurkan dibandingkan dengan tanah dengan mineral liat montmorilonitik tipe 2:1.

2.1.2 Penggenangan

Penggenangan lahan sawah setelah proses pengolahan tanah dan pelumpuran membawa konsekuensi perubahan fisiko kimia tanah. Perubahan kimia akibat penggenangan sangat memengaruhi dinamika dan ketersediaan hara di dalam tanah. Transformasi kimia yang terjadi berkaitan erat dengan aktivitas mikroba tanah yang menggunakan oksigen sebagai sumber energinya dalam proses respirasi. Keadaan reduksi akibat penggenangan akan mengubah

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

Ada tiga kelompok mikroba tanah yang sangat berperan dalam proses perubahan kimia tanah sawah, yaitu mikroba aerob yang terdapat di lapisan permukaan atas tanah yang tipis (lapisan oksidasi) dan dalam air genangan yang memanfaatkan oksigen yang terdapat dalam air genangan. Pada lapisan tipis ini proses oksidasi secara biologis terjadi, misalnya oksidasi NH_4^+ menjadi NO_3^- atau S^{2-} menjadi SO_4^{2-} . Lapisan di bawahnya disebut lapisan reduksi, di mana hidup mikroba-mikroba fakultatif dan obligat anaerob yang mendapatkan sumber energinya melalui reduksi biologis dari senyawa-senyawa NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{3+} , dan Mn^{4+} menjadi NO_2^- , SO_2^{2-} , S_2 , Fe^{2+} , dan Mn^{2+} . Perubahan-perubahan kimia tanah sawah tersebut berkaitan erat dengan proses oksidasi-reduksi (redoks) dan aktivitas mikroba tanah sangat menentukan tingkat ketersediaan hara dan produktivitas tanah.

Perubahan kimia dan elektrokimia tanah dalam keadaan tergenang yang penting adalah:

- Berkurangnya oksigen dalam tanah, mikroba anaerob lebih aktif.
- Turunnya nilai potensial reduksi-oksidasi (redoks).
- Peningkatan pH pada tanah masam dan penurunan pH pada tanah alkali atau tanah kapur menuju keseimbangan pH sekitar netral.
- Reduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} dan Mn^{4+} menjadi Mn^{2+} .
- Reduksi NO_3^- dan NO_2^- menjadi NH_4^+ , N_2 dan N_2O .
- Peningkatan ketersediaan fosfat, silikon, dan molibdenum.
- Menurunkan hara Zn (seng) dan Cu (tembaga) yang larut.
- Merangsang terbentuknya senyawa karbon dioksida, metan, dan senyawa beracun seperti asam organik dan sulfida hidrogen.

2.1.3 Status Oksigen

Dalam keadaan tergenang, air menggantikan udara dalam pori dan rongga tanah, kecuali pada lapisan tipis di permukaan tanah. Dalam keadaan demikian, mikroba tanah menggunakan senyawa yang menggunakan oksigen sebagai pengganti O_2 bebas sebagai aseptor elektron untuk keperluan respirasi yang menyebabkan tanah tereduksi. Keadaan anaerobik ini memengaruhi ketersediaan berbagai unsur hara dan pembentukan senyawa beracun.

Pada tanah aerobik, oksigen dari udara cukup tersedia untuk memenuhi aktivitas mikroba dan tanaman. Tanaman padi mampu memanfaatkan kondisi tanah tergenang, karena akarnya memperoleh oksigen dari udara melalui jaringan

aerenkhima dan rongga udara dalam batang tanaman. Dalam keadaan tergenang, mikroba anaerobik menjadi aktif, bahan organik melapuk lebih lambat dan kurang sempurna dibandingkan dengan tanah kering atau tanah yang bersifat aerobik.

2.1.4 Potensial Reduksi dan Oksidasi (Redoks)

Lapisan atas tanah tergenang mengandung oksida besi, nitrogen, dan belerang, sedangkan lapisan bawah mengandung unsur-unsur tersebut dalam keadaan tereduksi. Tebalnya lapisan oksidasi ditentukan oleh suplai nitrogen dan laju konsumsi oksigen dalam tanah. Perbedaan kedua lapisan tanah tersebut dicirikan oleh potensi redoks. Patrick dan Delaune (1972) menyebutkan bahwa tebal lapisan oksidasi berbeda, bergantung pada berbagai komponen dari profil dengan belerang sebagai zone oksidasi paling tebal, mangan paling tipis, dan besi antara keduanya.

Bila tanah digenangi, persediaan oksigen menurun sampai nol dalam waktu kurang dari sehari (Sanchez, 1993). Laju difusi oksigen udara melalui lapisan air 10 ribu kali lebih lambat daripada melalui pori yang berisi udara. Mikroba aerob dengan cepat menghabiskan udara yang tersisa dan menjadi tidak aktif lagi atau mati. Mikrobia fakultatif anaerob dan obligat anaerob kemudian mengambil alih dekomposisi bahan organik tanah dengan menggunakan oksida (seperti nitrat, Mn, Fe-oksida, dan sulfat) atau hasil penguraian bahan organik (fermentasi) sebagai penerima elektron dalam pernafasan (Sanchez, 1993; Kyuma, 2004). Setelah tanah aerobik digenangi, akan terjadi penurunan potensi redoks (Eh) mencapai +0,2 V sampai -0,3 V yang relatif stabil, tetapi potensi redoks pada lapisan atas tanah bertahan pada +0,3 V sampai +0,5 V (Ponnamperuma, 1972). Dengan demikian, rizosfer dalam keadaan tereduksi, tetapi daerah dekat perakaran dapat teroksidasi.

Tanah yang tergenangi tidak tereduksi secara keseluruhan. Pada lapisan atas (2 mm–20 mm) tetap oksidatif karena berada dalam keseimbangan dengan oksigen yang terlarut dalam lapisan air. Lapisan di bawahnya merupakan lapisan tereduksi kecuali daerah perakaran yang aktif, karena daerah ini teroksidasi akibat dikeluarkannya senyawa teroksidasi oleh akar yang memperoleh oksigen dari bagian atas melalui aerenkhima (Yoshida, 1981). Pada penampang tanah tampak lapisan oksidasi berwarna kecokelatan dan lapisan reduksi di bawahnya berwarna abu-abu (*gleyish*) dengan sedikit bercak-bercak cokelat kekuningan.

Penurunan potensi redoks mempunyai dampak positif maupun negatif. Keuntungannya adalah meningkatnya suplai nitrogen, fosfor, kalium, besi, mangan, molibdenum, dan silikon. Kerugiannya, hilangnya nitrogen karena denitrifikasi serta turunnya persediaan hara belerang, seng, tembaga, dan terjadinya produksi senyawa yang mengganggu serapan hara tanaman. Ponnamperuma (1978) menyebutkan kisaran optimum potensi redoks adalah 10 mV–120 mV. Proses

Tabel 1. Urutan termodinamika reaksi reduksi utama yang terjadi pada tanah tergenang

Tahap	Eh7 (mV)	Reaksi
0	800	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
1	430	$2NO_3^- + 12H^+ + 10e^- \rightarrow N_2 + 6H_2O$
2	410	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$
3	130	$Fe(OH)_3 + e^- \rightarrow Fe(OH)_2 + OH^-$
4	-180	Asam organik (laktat, piruvat) + $2H^+ + 2e^- \rightarrow$ alkohol
5	-200	$SO_4^{2-} + H_2O + 2e^- \rightarrow SO_3^{2-} + 2OH^-$
6	-490	$SO_3^{2-} + 3H_2O + 6e^- \rightarrow S_2^{2-} + 6OH^-$

perubahan unsur sesuai dengan berubahnya nilai potensi redoks tanah disajikan pada Tabel 1.

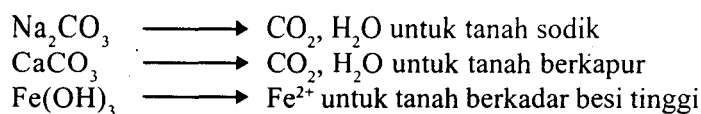
Yoshida (1981) menyatakan bahwa proses reduksi merupakan proses yang mengonsumsi elektron (terjadi penurunan Eh) dan menghasilkan ion OH^- (pH meningkat) dan besi fero. Kecepatan reduksi, macam, dan hasil reduksi ditentukan oleh: (a) macam dan kandungan bahan organik, (b) macam dan konsentrasi zat anorganik penerima elektron, (c) pH, dan (d) lama penggenangan (Yoshida 1981). Menurut Sanchez (1993), kuatnya proses reduksi bergantung pada jumlah bahan organik yang mudah melapuk. Makin tinggi kandungan bahan organik tanah makin besar kekuatan reduksinya. Kadar zat yang tereduksi mencapai puncak pada 2–4 minggu setelah penggenangan, kemudian berangsur-angsur menurun sampai pada tingkat keseimbangan.

Reaksi potensial redoks dan pH pada tanah tergenang selalu bekerja bersama-sama, dan keadaan ini sangat berpengaruh terhadap keseimbangan reaksi kimia. Meningkatnya nilai pH pada tanah masam dan berkurangnya nilai pH pada tanah alkalin akibat penggenangan akan membantu pengambilan unsur hara oleh tanaman. Tanaman padi dapat menyerap unsur hara dan tumbuh pada kisaran pH 4–8. Serapan hara oleh tanaman dalam bentuk kation maksimum berkisar antara pH 6 dan 7, dan serapan hara akan berkurang pada pH 5 atau lebih rendah (Patrick and Reddy, 1978).

2.1.5 Perubahan pH

Dalam jangka waktu beberapa minggu setelah penggenangan, pH tanah masam meningkat dan tanah alkalin turun (Ponnamperuma *et al.*, 1966). Jadi, baik tanah masam maupun alkalin pH akhirnya mencapai 6–7 setelah penggenangan.

Perubahan pH setelah penggenangan disebabkan oleh beberapa faktor, seperti perubahan besi feri menjadi fero, sulfat menjadi sulfida, karbondioksida menjadi metan, dan penumpukan ammonium. Ponnamperuma (1967) dan Ponnamperuma *et al.* (1969) menyimpulkan bahwa perubahan pH tanah diatur oleh tiga sistem, yaitu,



Kedua yang pertama mengatur penurunan pH tanah alkali, yang ketiga merupakan sistem redoks yang mengatur peningkatan pH, terutama pada tanah masam. Pada tanah berkadar bahan organik atau besi aktif (Fe^{2+}) rendah atau berkadar cadangan asam yang tinggi, misalnya tanah sulfat masam, pH tidak dapat mencapai 6,0 meskipun digenangi selama berbulan-bulan.

Pada tanah alkali, bahan organik mempertajam penurunan pH. Suhu rendah memperlambat perubahan pH, baik pada tanah masam maupun alkali. Oleh karena itu, nilai pH pada tanah tergenang umumnya bertahan mendekati pH 7,0 dan kisarannya lebih sempit daripada tanah aerobik. Keadaan pH netral pada tanah tergenang berpengaruh terhadap pertumbuhan padi, yaitu:

- Pengaruh buruk pH yang terlalu rendah atau tinggi menjadi berkurang
- Keracunan besi dan mangan dihindarkan
- Keracunan besi pada tanah masam dikurangi
- Ketersediaan fosfat, molibdenum, dan silikon meningkat
- Mineralisasi bahan organik lebih baik
- Asam organik terurai
- Pengapuran jarang diperlukan

Konsentrasi ion fero dalam tanah sangat peka terhadap perubahan pH. Kenaikan pH satu unit dari 6,25 ke 7,25 menurunkan konsentrasi Fe^{2+} sebanyak 100 kali (Tabel 2).

2.1.6 Reduksi Fe^{3+} Menjadi Fe^{2+}

Setelah tanah digenangi, oksida Fe^{3+} direduksi menjadi senyawa Fe^{2+} . Warna tanah berubah dari coklat menjadi abu-abu dan Fe^{2+} dalam jumlah besar masuk ke dalam larutan tanah. Konsentrasi besi larut beragam dari 0,1 ppm tidak lama setelah penggenangan, sampai 600 ppm. Pada tanah sulfat masam, konsentrasi ini dapat mencapai 5.000 ppm beberapa minggu setelah penggenangan (Ponnamperuma, 1976).

Tabel 2. Hubungan antara pH dan konsentrasi Fe^{2+} pada tanah tergenang

pH	Fe^{2+} (ppm)	pH	Fe^{2+} (ppm)
6,25	1114	7,00	35
6,50	352	7,25	11
6,75	111	7,50	3,5

Redman dan Patrick (1965) melaporkan bahwa konsentrasi besi fero setelah penggenangan mempunyai korelasi yang positif dengan kandungan liat dan bahan organik. Faktor lain yang pengaruh terhadap konsentrasi besi fero dalam keadaan tergenang adalah kadar oksida Fe^{3+} , pH tanah, potensial redoks, dan suhu.

Tanah sangat masam dengan kadar bahan organik dan oksida berat yang cukup dapat menghasilkan konsentrasi besi fero sampai tingkat beracun pada tanah Ultisol, Oksisol, dan sulfat masam (Ponnamperuma *et al.*, 1973). Keracunan besi dapat terjadi pada tanah pasir masam dan gambut berkadar besi yang rendah. Ismunadji dan Damanik (1984) melaporkan bahwa keracunan besi pada tanaman padi sering dijumpai di daerah pasang surut di Sumatera dan Kalimantan, yang tanahnya kebanyakan tanah gambut yang berasosiasi dengan tanah sulfat masam.

2.1.7 Reduksi Mn^{4+} menjadi Mn^{2+}

Pada tanah tergenang, reduksi mangan bervalensi tinggi, sebagian besar Mn^{4+} , terjadi bersamaan dengan denitrifikasi (Ponnamperuma, 1965). Mangan lebih mudah tereduksi dan lebih mudah larut daripada besi. Oleh karena itu, pelepasan mangan dalam larutan tanah mendahului besi. Pada pH tanah di atas 8,5; kelarutan Mn rendah, namun pada tanah masam dengan $\text{pH} < 4,5$ kelarutan Mn cukup tinggi. Kinetik reduksi mangan bergantung pada kondisi redoks tanah (Kyuma, 2004). Tanah dengan kadar mangan yang tinggi, terlepas dari pH dan kadar bahan organik, menunjukkan peningkatan Mn^{2+} yang tajam pada minggu pertama setelah penggenangan, kemudian turun dengan lambat.

2.2 Perubahan Permanen

2.2.1 Penerasan dan Perataan

Pengelolaan lahan sawah menjadi bentuk seperti kolam air membutuhkan beberapa tahapan pekerjaan seperti penggalian, penimbunan, perataan, dan pelumpuran (Prihar *et al.*, 1985). Keberhasilan pembuatan sawah baru sangat ditentukan oleh topografi dan hidrologi tanah asalnya (Hardjowigeno dkk., 2004). Penggalian, penimbunan, dan perataan tanah bertujuan untuk mendapatkan tinggi permukaan air yang sama untuk setiap sisi lahan.

Apabila lahan yang akan disawahkan mempunyai relief/topografi yang agak curam dibutuhkan pembuatan teras bangku permanen untuk menjaga agar tidak terjadi proses erosi dan kehilangan air secara berlebihan. Kesuburan tanah sawah baru pada sistem teras sangat berbeda dengan tanah asal karena adanya proses penggalian dan penimbunan sehingga susunan horizon tanah asal bisa hilang

sama sekali. Makin curam lereng, makin sempit teras dan makin dalam penggalian dan penimbunan. Pada bagian tanah yang digali, horizon atas penciri (epipedon) dapat hilang, sementara horizon bawah penciri tertinggal sebagian atau hilang sama sekali. Dalam hal ini akan terjadi perubahan klasifikasi tanah (Hardjowigeno dkk., 2004).

Tinggi permukaan air tanah atau sistem hidrologi tanah asal sangat menentukan sawah yang akan dibentuk. Pembuatan sawah yang berasal dari lahan basah/rawa dilakukan dengan membuat saluran-saluran drainase untuk mengeringkan lahan sesuai kebutuhan tanaman. Oleh karena itu, dalam jangka panjang akan terjadi perubahan sifat dan morfologi tanah asal yang semula basah menjadi kering dari lapisan atas ke lapisan bawah. Apabila tanah asal mengandung bahan sulfidik (pirit, FeS_2) maka akan terjadi proses oksidasi pirit yang dapat memasamkan tanah dan terbentuk profil tanah yang mengandung karatan jarosit ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$). Sebaliknya, pembuatan sawah dari lahan kering membutuhkan pembasahan dari lapisan atas ke lapisan bawah yang membawa konsekuensi perubahan sifat fisiko kimia tanah (Hardjowigeno dkk., 2004).

Penambahan air irigasi yang mengandung lumpur menyebabkan petakan sawah mendapatkan tambahan mineral yang berasal dari endapan lumpur. Kualitas dan jumlah lumpur yang diendapkan sangat bervariasi, bergantung pada sumber lumpur dan kualitas air irigasi. Debu dan liat yang terbawa air irigasi akan terakumulasi pada lapisan tanah asli.

2.2.2 Perubahan Fisik Tanah

Pengaruh pelumpuran dalam jangka panjang terhadap sifat fisik tanah seperti struktur di permukaan tanah sangat dipengaruhi oleh tekstur dan stabilitas agregat tanah. Stabilitas agregat ditentukan oleh jumlah dan tipe mineral liat, bahan organik, oksida dan hidroksida yang berfungsi sebagai perekat antara agregat, serta konsentrasi elektrolit dalam larutan tanah (Prihar *et al.*, 1985). Pelumpuran menyebabkan struktur tanah menjadi masif atau struktur lempeng dan tiang pada kedalaman 10 cm–20 cm.

Stratifikasi. Pembentukan lapisan-lapisan (strata) dalam solum tanah setelah proses pelumpuran pada umumnya terjadi pada tanah bertekstur medium. Fraksi pasir mengendap terlebih dahulu menempati tempat terbawah dan selanjutnya ditutup oleh debu halus dan liat. Ketebalan masing-masing lapisan sangat dipengaruhi oleh tekstur tanah awal. Pada tanah berpasir, keberadaan lapisan liat sangat tipis dan bahkan tidak terbentuk. Pada tanah liat halus, kemungkinan tidak ada lapisan pasir kasar. Sebaliknya pada tanah mineral bertekstur medium seperti lempung liat berpasir, strata lapisan terbentuk dengan

baik, fraksi-fraksi halus tanah menutup fraksi pasir di bagian bawah (Moorman dan van Breemen, 1978).

Lapisan kedap (*plow pan/traffic pan*). Kelembapan tanah saat pengolahan dan pelumpuran tanah menentukan tingkat kehancuran agregat tanah dan pemadatan yang terjadi di bawah lapisan lumpur. Berat beban peralatan pengolahan tanah berupa traktor atau hewan (sapi/kerbau) dalam jangka panjang menyebabkan pemadatan tanah. Tanah yang memadat pada kedalaman 10–25 cm terbentuk setelah bertahun-tahun kemudian mengubah karakteristik penyebaran, retensi, dan pengisian air tanah (Moorman and van Breemen, 1978). Adanya pemadatan tanah secara fisik dan pengendapan secara kimia dari Fe, Mn, dan Si menyebabkan terbentuknya lapisan kedap (*hard pan/traffic pan/plow pan/impermeable layer*) (Sharma dan De Datta, 1985).

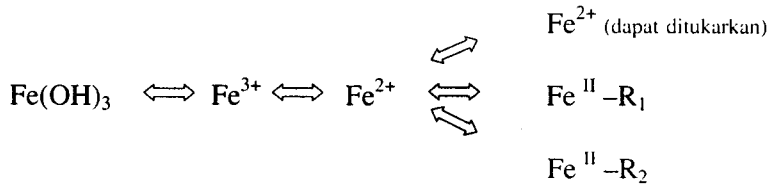
Lapisan kedap sangat bermanfaat untuk efisiensi penggunaan air pada lahan sawah, tetapi apabila terbentuk pada lapisan yang dangkal akan menghambat pertumbuhan akar tanaman. Perkembangan dan kepadatan lapisan kedap sangat dipengaruhi oleh tekstur, struktur, dan jenis mineral liat. Tanah dengan tekstur lempung mendukung terbentuknya lapisan kedap, sedangkan tanah hidromorf atau tanah dengan kadar liat dan natrium tinggi kurang mendukung terbentuknya lapisan kedap. Curfs (1976) melaporkan bahwa pada tanah lempung berpasir di Ibadan, Nigeria, lapisan kedap terbentuk setelah tiga tahun tanah disawahkan. Pada tanah sedimen liat di Kyushu, Jepang, penyawahkan hingga 10–12 tahun tidak membentuk lapisan kedap. Lapisan kedap baru mulai terbentuk setelah 50 tahun dan menjadi lapisan kedap yang sempurna setelah 200 tahun disawahkan (Kano *et al.*, 1960 dalam Prihar *et al.*, 1985). Rekahan dan *self-mulching* dapat menghancurkan lapisan kedap yang baru terbentuk pada tanah Vertisol. Pada tanah-tanah yang berstruktur stabil seperti Andisol, Oxisol, dan tanah organik, lapisan kedap terbentuk sangat lambat.

Lapisan kedap bermanfaat bagi kelancaran aktivitas manusia dan peralatan mekanisasi di atasnya karena mempunyai bobot isi yang tinggi dan kedap air. Apabila lapisan ini hancur, maka solum tanah akan menjadi lebih dalam, lembek, dan berlumpur yang berakibat terhambatnya laju pengoperasian alat pengolahan tanah seperti traktor.

Penggenangan yang terus-menerus sepanjang tahun akan menciptakan kondisi yang sangat reduktif di dalam tanah sehingga mendukung terbentuknya lapisan pengendapan Fe, Mn, dan Si.

Bercak karatan (*mottles*). Pada lapisan olah di permukaan tanah, besi fero yang terlarut dan dapat dipertukarkan akan teroksidasi secara cepat dan membentuk besi feri berbentuk bercak karatan berwarna kecokelatan (Kyuma, 2004). Bercak selaput tipis karatan oksida besi akan terbentuk pada dinding rekahan. Besi fero juga akan mengalami difusi dari dalam matriks tanah ke

permukaan rekahan yang selanjutnya teroksidasi di permukaan butir struktur (*ped*). Karat/bercak tabular terbentuk di sepanjang dinding akar tanaman padi. Adanya oksigen sebagai hasil respirasi akar akan mengendapkan besi fero menjadi besi feri di sepanjang permukaan dinding akar tanaman padi. Bercak karatan berwarna abu-abu cokelat yang tersebar di dalam solum tanah terjadi akibat aktivitas mikroba pengoksidasi besi fero. Perubahan besi dari suasana oksidatif ke reduktif dapat digambarkan sebagai berikut.



Seperti halnya besi, senyawa mangan juga terpengaruh oleh penggenangan. Mangan lebih mudah tereduksi dan lebih mudah larut daripada besi sehingga pelepasan mangan dalam larutan tanah mendahului besi (De Datta, 1981).

Perubahan morfologi tanah. Senyawa besi feri dan mangan dalam kondisi anaerob akan tereduksi menjadi bentuk besi fero dan mangan yang sangat mudah bergerak. Besi dan mangan selanjutnya akan bergerak bersama air perkolasi dari lapisan olah menuju ke lapisan tanah yang lebih dalam di lapisan subsoil yang bersifat sedikit oksidatif dan selanjutnya diendapkan di horizon iluviasi. Laju pengendapan mangan lebih cepat dibanding besi feri karena derajat anaerob (Eh) Mn terjadi lebih dulu dibanding Fe (Kyuma, 2004).

Besi dan mangan yang tercuci ke bawah bersama air perkolasi pertamanya akan mengalami proses jerapan kation oleh partikel liat dan selanjutnya akan diendapkan dalam bentuk oksidanya di horizon iluviasi. Reduksi senyawa oksida besi dan mangan membentuk lapisan atau daerah pengendapan (Kawaguchi dan Kyuma, 1977). Proses ini dianggap sebagai penyebab terbentuknya warna abu-abu (*gley*) pada lapisan olah tanah. Mitsuchi (1974) menyatakan bahwa yang menyebabkan terjadinya warna abu-abu ini adalah derajat valensi besi.

Pada tanah-tanah yang mempunyai permukaan air dangkal tidak akan tampak perbedaan morfologi tanah akibat proses penggenangan dan pengeringan. Sebaliknya, pada tanah yang memiliki permukaan air tanah dalam, perbedaan morfologi tanah sawah dan nonsawah akan terlihat lebih jelas.

2.2.3 Perubahan Kimia Tanah

Akumulasi Bahan Organik. Tanah sawah mengalami penggenangan paling sedikit selama 3–4 bulan dalam satu tahun. Selama masa penggenangan tersebut, kondisi tanah dalam keadaan anaerob atau reduksi di mana keberadaan oksigen sangat minimal. Pada keadaan ini dekomposisi bahan organik tidak berjalan optimal dan proses fermentasi merupakan bentuk utama transformasi yang berlangsung. Akibatnya, kandungan bahan organik tanah sawah lebih tinggi dibandingkan tanah kering (Kyuma, 2004).

Mitsuchi (1974) memperlihatkan pengaruh penggenangan terhadap akumulasi bahan organik tanah. Kandungan bahan organik pada tanah sawah mencapai 2–3 kali lebih tinggi dibandingkan tanah kering akibat pasokan bahan organik yang lebih tinggi di lahan sawah. Setiap hektare lahan sawah di Jepang dapat menghasilkan sekitar 10 t/ha biomassa jerami, jauh lebih tinggi dibanding dengan biomassa yang dihasilkan dari lahan kering. Akar dan batang padi yang tertinggal yang ditanamkan selama masa pengolahan tanah dapat menambah biomassa 2 t–3 t/ha. Gulma yang tumbuh selama masa pengeringan bila ditanamkan dapat menyumbang 2 t–3 t/ha setara dengan penambahan 12 t/ha pupuk kandang atau 23 t/ha pupuk hijau. Ketidakefisienan dekomposisi bahan organik dalam kondisi anaerob menyebabkan bahan organik terakumulasi di dalam tanah. Bahan organik merupakan sumber N dan mineral lain bagi tanaman padi.

Ferrolisis. Perubahan komposisi kation yang dapat dipertukarkan pada tanah sawah selama proses penggenangan dan pengeringan dalam jangka panjang memberikan dampak besar terhadap karakteristik tanah sawah. Brinkman (1970) melaporkan bahwa fenomena perubahan kation yang dapat dipertukarkan dan kapasitas tukar kation tanah sawah dipicu oleh perubahan besi fero-feri yang disebut sebagai ferrolisis. Ferrolisis merupakan proses pembentuk tanah sawah yang diakibatkan oleh penghancuran mineral liat oleh kondisi oksidasi dan reduksi secara silih berganti. Ferrolisis menyebabkan terbentuknya tanah masam dengan horizon permukaan yang pucat dengan kandungan bahan organik, liat, dan basa-basa rendah serta kejenuhan Al yang tinggi. Tanah ini juga mempunyai kapasitas tukar kation (KTK) rendah akibat interlayer liat 2:1 diisi oleh polimer Al dan besi fero. Penurunan nilai KTK dapat menurunkan produktivitas tanah. Adanya besi dan liat yang tinggi pada lapisan bawah menyebabkan terbentuknya lapisan kedap air sehingga air tertahan di dalam solum tanah sawah (Brinkman, 1978). Sebaran tanah ini cukup luas di Asia Tenggara dan tersebar di dataran rendah yang mendapatkan genangan dari air hujan. Oleh karenanya kesuburan tanah-tanah ini rendah.

Mineral liat. Komposisi mineral liat di dalam tanah tidak mudah berubah akibat pengelolaan. Namun, tanah sawah yang mengalami kondisi basah dan kering secara bergantian dalam jangka panjang dapat mengubah susunan atau jenis mineral liat yang ada. Sebagai contoh, mineral liat kristalin haloisit akan berubah menjadi mineral amorf dalam beberapa tahun apabila terjadi pembasahan dan pengeringan secara terus-menerus (Brinkman, 1978). Munir (1987) mengatakan bahwa telah terjadi perubahan jenis mineral liat pada beberapa jenis tanah yang disawahkan. Mineral liat tipe 2:1 seperti vermikulit dan montmorilonit pada lapisan olah di beberapa lahan sawah telah mengalami pelapisan (*interlayer*) polimer Al.

Pelapisan terjadi bila tanah masam banyak mengandung Al dan terjadi proses penggenangan dan pengeringan secara silih berganti. Pelapisan mineral oleh polimer hanya terjadi pada tanah yang mengandung mineral tipe 2:1 karena mempunyai lapisan dalam (*interlayer*) di antara kisi-kisi mineral yang dapat diduduki polimer Al. Pada tanah dengan tipe mineral liat 1:1 tidak terjadi peristiwa ini karena tidak mempunyai lapisan dalam.

3. KEBUTUHAN HARA TANAMAN PADI

Ada 19 unsur makro dan mikro yang dibutuhkan tanaman, yaitu C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Cl, (Na, Si, dan Co). Unsur hara disebut esensial apabila memenuhi tiga syarat, yaitu (i) tanpa unsur tersebut tanaman tidak tumbuh, (ii) mengalami gejala kekahatan yang spesifik, dan (iii) berperan dalam proses metabolisme tanaman. Na, Si, dan Co belum digolongkan secara umum sebagai hara esensial untuk tanaman, karena tidak semua jenis tanaman membutuhkannya. Na dibutuhkan oleh tanaman *chenopodiaceae* dan tanaman yang adaptif pada kondisi salin. Hara Si banyak dibutuhkan oleh tanaman sereal seperti padi, tebu, dan jagung. Hara Cl merupakan unsur terbaru yang ditambahkan ke dalam daftar unsur esensial (Mengel dan Kirkby, 1987).

Hara makro ditemukan dan dibutuhkan tanaman dalam jumlah lebih besar dibandingkan hara mikro. Sebagai contoh, nitrogen ditemukan dalam jaringan tanaman lebih dari 100 kali lipat unsur mikro Zn.

Jika ditinjau dari sudut pandang fisiologi tanaman, cukup sulit mengelompokkan unsur hara berdasarkan ketentuan di atas, dilihat dari kadarnya dalam jaringan tanaman. Oleh karena itu, pengelompokan berdasarkan atas fungsi biokimia di dalam metabolisme tanaman. Mengel dan Kirkby (1987) membagi unsur hara tanaman menjadi empat kelompok (Tabel 3). Kelompok pertama tergolong hara penyusun senyawa organik C, H, O, N, S. Karbon (C) diambil dalam bentuk CO_2 dari udara atau HCO_3^- dari dalam tanah. Hidrogen diambil dalam bentuk H_2O dari larutan tanah atau udara lembap. Oksigen

Tabel 3. Hubungan antara pH dan konsentrasi Fe^{2+} pada tanah tergenang

Hara tanaman	Bentuk yang diserap tanaman	Fungsi biokimia
Kelompok 1 C,H,O,N,S	$\text{CO}_2, \text{HCO}_3^-, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{NO}_3^-$, $\text{NH}_4^+, \text{N}_2, \text{SO}_4^{2-}, \text{SO}_2^-$ CO_2, O_2 dan N_2 Ion-ion diambil larutan tanah dan gas diambil dari udara.	penyusunan karbohidrat, asam-asam amino, protein, asimilasi, dan proses enzymatic.
Kelompok 2 P,B,Si	Diambil tanaman dari larutan tanah dalam bentuk anion fosfat, borat, silikat	Transfer energi, pertumbuhan sel
Kelompok 3 K,Na,Mg,Ca,Mn,Cl	Diambil tanaman dari larutan tanah dalam bentuk ion atau khelet	Fungsi tidak spesifik antara lain asimilasi, metabolisme karbohidrat dan protein, mengatasi tekanan osmose sel, aktivator enzym dan keseimbangan ion
Kelompok 4 Fe, Cu,Zn,Mo	Diambil tanaman dari larutan tanaman dalam bentuk ion	Aktivator enzym, asimilasi dan metabolisme

sebagian diambil dari O_2 udara, sisanya diserap tanaman dari dalam tanah dalam bentuk ion-ion anorganik sederhana. Bentuk kation maupun anion yang diserap tanaman akan berperan dalam proses asimilasi, metabolisme tanaman, katalis enzim, dan lain-lain.

Bahan penyusun jaringan tanaman terdiri atas 70% air, 27% bahan organik, dan 3% mineral. Distribusi jenis mineral di dalam tanaman dipengaruhi oleh jenis, umur, dan bagian tanaman. Biomassa tanaman banyak mengandung N dan K, sedangkan biji-bijian banyak mengandung P (Mengel, 1979 dalam Mengel dan Kirkby, 1987).

Varietas unggul padi sangat tanggap terhadap pemberian pupuk makro N, P, K. Untuk pertumbuhannya, tanaman padi mendapatkan input unsur hara dari (a) dalam tanah, (b) air irigasi, (c) hujan, (d) fiksasi nitrogen bebas, dan (e) pupuk. Output yang dihasilkan berupa (a) gabah, (b) jerami, (c) kehilangan hara akibat air perkolasi, dan (d) kehilangan hara dalam bentuk gas, terutama nitrogen. Berdasarkan perhitungan input dan output tersebut, maka untuk menghasilkan gabah rata-rata 6 t/ha (VUB), tanaman padi membutuhkan hara 165 kg N, 19 kg P, dan 112 kg K/ha atau setara dengan 350 kg urea, 120 kg SP36, dan 225 kg KCl/ha (Doberman and Fairhurst, 2000).

Apabila kebutuhan hara tidak terpenuhi, tanaman akan menguras unsur hara dari dalam tanah. Jika tanah tempat tumbuh tanaman padi tersebut subur, maka dalam jangka pendek tidak tampak terjadi penurunan hasil padi. Namun, dalam jangka panjang akan terjadi penurunan produktivitas tanah dan tanaman. Pengaruh kekurangan pupuk baru terlihat jelas apabila lahan kurang subur.

4. KETERSEDIAAN HARA

4.1 Nitrogen (N)

Ketersediaan nitrogen dalam keadaan tergenang lebih tinggi daripada tidak tergenang. Ketersediaan nitrogen meningkat dengan makin tingginya kadar nitrogen, pH, dan suhu tanah (Ponnamperuma, 1965). Sebagian besar N tanah berupa N organik, baik yang terdapat dalam bahan organik tanah maupun fiksasi N oleh mikroba tanah, dan hanya sebagian kecil (2%–5%) berupa N anorganik yaitu NH^{4+} dan NO_3^- , serta sedikit NO_2^- . Pada tanah tergenang N merupakan hara yang tidak stabil karena adanya proses mineralisasi bahan organik (amonifikasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi) oleh mikroba tanah tertentu.

Keadaan yang unik dalam keadaan tergenang menyebabkan modifikasi yang besar dari proses transformasi nitrogen (Gambar 1). Sebagian besar proses transformasi melibatkan mikroba. Pelapukan bahan organik yang dapat melepaskan ion amonium dalam larutan tanah berjalan lebih lambat dalam keadaan tergenang daripada tidak tergenang. Pasokan nitrogen untuk padi sawah terutama berasal dari

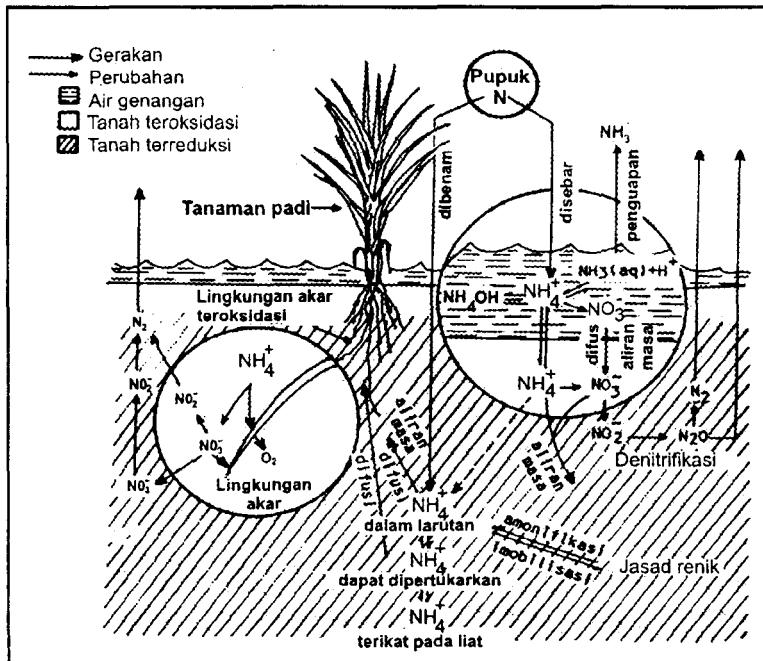
- Nitrogen amonium dan nitrat yang telah ada waktu tanah digenangi.
- Nitrogen berasal dari mineralisasi bahan organik dalam keadaan tergenang.
- Nitrogen yang difiksasi oleh ganggang dan bakteri heterotropik.
- Nitrogen yang berasal dari pupuk.

Sebagian besar nitrogen anorganik pada tanah tergenang larut dalam air atau diadsorpsi oleh kompleks pertukaran. Nitrogen anorganik dalam keadaan tergenang dicirikan oleh akumulasi amoniak. Dalam keadaan tergenang, nitrat cepat hilang karena denitrifikasi, pencucian, dan diserap oleh tanaman. Amonium dapat terfiksasi oleh mineral silikat, tidak larut dalam air, dan tidak mudah ditukar. Dari 14% sampai 78% nitrogen total pada tanah tropik berada dalam keadaan semacam ini.

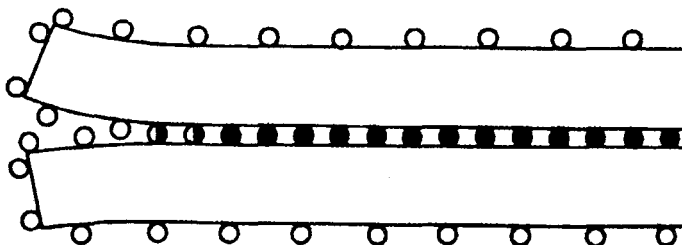
Fiksasi amonium di antara lapisan silikat pada mineral mika dapat dilihat pada Gambar 2. Urea dihidrolisis sama cepatnya pada tanah tergenang maupun aerobik (Delaune dan Patrick, 1970).

4.2 Mineralisasi Nitrogen pada Tanah Tergenang

Padi yang dipupuk memperoleh 50%–80% nitrogen dari tanah, sedangkan yang tidak dipupuk memperoleh nitrogen terutama dari mineralisasi bahan organik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan tertentu dapat meningkatkan mineralisasi bahan organik pada tanah tergenang, antara lain



Gambar 1. Transformasi nitrogen dalam tanah pada kondisi tergenang



Gambar 2. Skema miksa yang jenuh dengan NH_4^+ dan berada bersama-sama kalium

- Mengeringkan tanah di antara dua pertanaman padi sawah, misalnya saat bera menjelang musim hujan.
- Meningkatkan suhu tanah tergenang, misalnya air ditahan agar tidak mengalir keluar petakan.
- Meningkatkan pH sampai 9,0 dengan penambahan larutan alkali lemah.

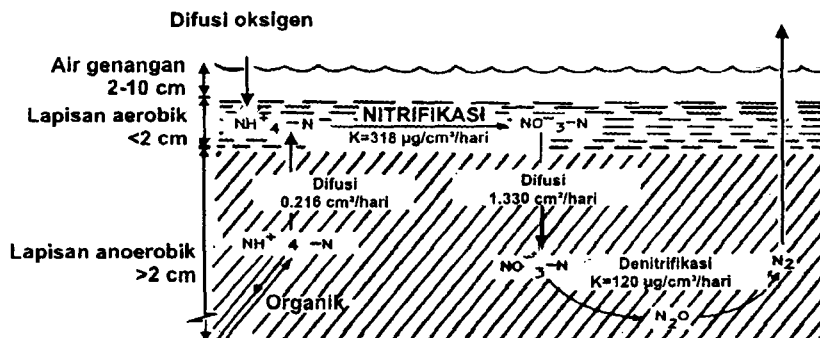
Broadbent (1979) menyebutkan bahwa faktor-faktor penting yang berpengaruh terhadap mineralisasi bahan organik antara lain adalah suhu, kadar air, penggenangan, dan pengeringan secara bergantian, dan kadar bahan organik.

4.3 Kehilangan Nitrogen

Kehilangan hara N terutama disebabkan oleh denitrifikasi, volatilisasi, pelindian, dan tercuci oleh aliran permukaan. Besarnya kehilangan hara N dari pupuk nitrogen yang diberikan diperkirakan 20%–40% di India, 37% di California, 68% di Louisiana, 25% di Filipina (Chaudhary dan Ghildyal, 1969), dan 52%–71% di Indonesia (Ismunadji dkk., 1975). Di Jepang, kehilangan N melalui denitrifikasi sekitar 38%, tercuci 10% yang sebagian kecil melalui aliran permukaan (Kyuma, 2004). Penelitian Ismunadji dkk. (1975) menunjukkan bahwa kehilangan nitrogen makin banyak dengan pemupukan hara N yang makin tinggi. Di samping itu, imobilisasi dan fiksasi amonium menyebabkan nitrogen untuk sementara tidak tersedia bagi tanaman. Penelitian di Sukamandi menunjukkan bahwa kehilangan N melalui kedua proses tersebut dapat mencapai 70%. Oleh karena itu, pupuk N harus diberikan ke dalam lapisan reduksi dengan beberapa kali pemberian untuk mengurangi kehilangan N sehingga efisiensinya meningkat.

Patrick dan Reddy (1978) meneliti secara luas mekanisme dan kinetik proses nitrifikasi-denitrifikasi di laboratorium tanpa tanaman. Takana dan Navasero (1964) melaporkan bahwa kehilangan nitrogen dari tanaman sendiri dapat mencapai 30% karena pencucian oleh embun atau air hujan. Perilaku nitrogen yang diberikan sebagai pupuk (seperti urea atau ZA) kepada tanah tergenang disajikan pada Gambar 3.

Fiksasi nitrogen oleh mikroba di dalam tanah merupakan salah satu penjelasan tentang kesuburan tanah sawah untuk jangka panjang. Mikroba utama yang menambat nitrogen dari udara pada tanah sawah adalah: ganggang biru hijau, paku air, dan azolla yang berasosiasi dengan ganggang biru hijau (*Anabaena azollae*), bakteri penambat nitrogen nonsimbiotik di sekitar perakaran, dan bakteri nonsimbiotik pada tanah aerobik (Watanabe *et al.*, 1977).



Gambar 3. Reaksi nitrifikasi-denitrifikasi pada tanah tergenang (Craswell dan Vlek, 1979)

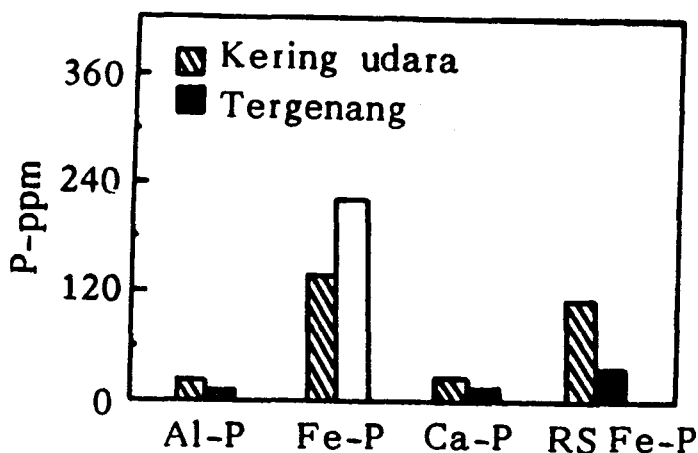
Aldrich (1980) menyatakan bahwa penggunaan pupuk N secara berlebihan dapat menyebabkan tanaman lebih peka terhadap penyakit, mudah rebah, dan meningkatkan butir hampa. Peng dan Cassman (1994) melaporkan pula bahwa penggunaan pupuk N secara berlebihan sering menyebabkan polutan nitrat pada air dan makanan sehingga mengganggu kesehatan manusia. Oleh karena itu, program pemupukan N untuk padi sawah seyogianya memenuhi persyaratan, antara lain (1) memenuhi keperluan tanaman akan sumber N yang berkaitan dengan ketersediaan N dalam tanah dan suplai N dari luar untuk mendapatkan hasil yang tinggi, baik kuantitas maupun kualitas gabah, (2) menekan kehilangan N dari tanah, tanaman dan air untuk pelestarian lingkungan, (3) mudah digunakan oleh petani, dan (4) teknologi baru pengelolaan N yang dianjurkan lebih mudah diterapkan dibandingkan dengan teknologi yang sudah ada.

4.4 Fosfor (P)

Ketersediaan fosfat meningkat setelah penggenangan, terutama karena reduksi feri (Fe^{3+}) fosfat menjadi fero (Fe^{2+}) fosfat, meskipun terjadi perubahan-perubahan yang lain, seperti hidrolisis dari aluminium fosfat dan larutan kalsium fosfat. Mekanisme perubahan yang dimaksud adalah sebagai berikut

1. Reduksi ferifosfat (Fe^{3+}) menjadi ferofosfat (Fe^{2+}) melepaskan P, walaupun sejumlah P yang dilepaskan akan diserap kembali (Willet, 1989).
2. Pelepasan *occluded* P akibat reduksi ferioksida yang menyeliputi P menjadi fero oksida yang lebih larut selama penggenangan. Penyeliputan P oleh ferioksida berada dalam liat dan zarah liat membentuk *occluded* P (Sanchez, 1993).
3. Peningkatan pH tanah masam akibat penggenangan meningkatkan kelarutan strengit dan variscit, selanjutnya terjadi peningkatan ketersediaan P. Sebaliknya, ketika pH pada tanah alkalin menurun dengan adanya penggenangan, stabilitas mineral kalsium fosfat akan menurun, akibatnya senyawa kalsium fosfat larut (Willet, 1985).
4. Dekomposisi bahan organik pada kondisi tanah anaerob meningkatkan kelarutan dari senyawa Ca-P maupun Fe-P dan Al-P melalui proses khelasi.

Pengeringan tanah setelah penggenangan umumnya menurunkan kelarutan fosfor yang berasal dari tanah maupun pupuk dan meningkatkan fiksasi fosfor sehingga menurunkan kelarutan fosfor. Di antara berbagai fraksi fosfat, fosfat yang diseliputi oksida besi yang berkadar air (*occluded phosphate*) adalah sangat menarik karena tidak tersedia pada tanah yang tidak tergenang. Patrick dan Mahapatra (1968) pada percobaannya menggunakan tanah masam, menyimpulkan bahwa di antara berbagai senyawa besi, Fe-P paling dominan dalam keadaan tergenang (Gambar 4).



Gambar 4. Transformasi P pada tanah tergenang

Peningkatan kelarutan fosfat rendah pada tanah masam Ultisol yang berkadar besi aktif yang tinggi. Kapasitas tanah untuk memfiksasi fosfor dianggap sebagai parameter yang penting untuk menentukan rekomendasi takaran fosfat yang cukup untuk memperoleh tanggapan terhadap pemupukan. Meskipun mobilitas fosfor pada tanah tergenang lebih tinggi daripada tidak tergenang, fosfor larut yang diberikan kepada tanah difiksasi pada permukaan butiran padatan tanah (Chang, 1976).

Jumlah relatif fosfor yang difiksasi oleh aluminium, besi, atau kalsium bergantung pada luas permukaan reaktif dari kation yang bersangkutan pada padatan dan konsentrasi dari kation-kation dalam larutan tanah. Aluminium dan kalsium fosfat akan ditransformasikan menjadi fosfat besi. Laju transformasi ini meningkat apabila air tersedia. Jadi, dalam keadaan tanah tergenang, fosfor tersedia diduga disimpan sebagai fosfat besi pada permukaan padatan (Chang, 1976).

Fiksasi fosfor berlangsung cepat pada tanah tergenang yang bereaksi masam atau netral. Fiksasi tersebut jauh lebih lemah pada tanah yang bereaksi agak alkali (De Datta *et al.*, 1966). Tanah yang mengandung oksida besi dan aluminium, halosit, dan alofan memfiksasi fosfor dalam keadaan tergenang maupun tanah kering.

4.5 Kalium (K)

Penggenangan menurunkan potensial redoks (Eh) tanah sehingga meningkatkan kelarutan Fe^{2+} dan Mn^{2+} . Kation-kation ini dapat menggantikan K yang diadsorpsi liat sehingga K dilepaskan ke dalam larutan tanah. Oleh sebab itu, penggenangan dapat meningkatkan ketersediaan K tanah. Yoshida

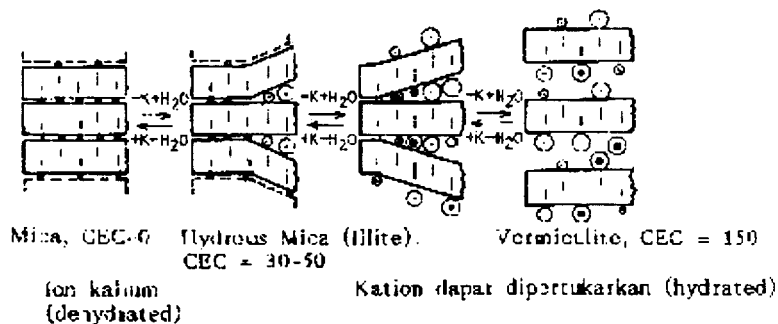
(1981) mengemukakan bahwa tanggapan padi sawah terhadap pemupukan K umumnya rendah karena kebutuhan K dapat dicukupi dari cadangan mineral K yang berada dalam keseimbangan dengan K dalam larutan tanah, air irigasi, dan dekomposisi bahan organik. Pada tanah sawah yang drainasenya buruk karena Eh-nya sangat rendah dapat terjadi kekahatan K. Hal ini karena daya oksidasi akar sekitar rizosfer sangat rendah dan adanya akumulasi asam-asam organik dalam larutan tanah, yang dapat menghambat serapan K oleh akar (Yoshida, 1981).

Di tanah ada empat bentuk kalium yang berada dalam keseimbangan yang dinamik, yaitu (1) K larut tersedia bagi tanaman; (2) K dapat ditukar sebagai cadangan yang mudah dimobilisasikan; (3) K tidak dapat ditukar sebagai cadangan yang sukar dimobilisasikan; dan (4) K terikat mineral sebagai cadangan semi permanen. Mekanisme fiksasi kalium dan pelepasannya belum diketahui secara jelas. Hal ini dipengaruhi oleh sifat koloid tanah, penggenangan dan pengeringan, suhu, dan ada tidaknya kapur. Hanya 1%–2% dari kalium total dari tanah mineral tersedia bagi tanaman dalam larutan tanah atau sebagai kalium dapat ditukar pada koloid tanah. Dalam keadaan tertentu, kalium yang diberikan difiksasi oleh koloid tanah menjadi tidak mudah tersedia bagi tanaman. Bentuk kalium tidak dapat ditukar berada dalam keseimbangan dinamik dengan bentuk kalium tersedia dan merupakan cadangan penting yang dapat dilepaskan secara lambat.

Liat tipe 2:1 (vermikulit, mika, dan beidelit) dapat dengan mudah memfiksasi kalium dalam jumlah besar (McLean, 1978). Fiksasi dari kalium yang diberikan kepada tanah adalah kecil pada tanah Latosol, lebih besar pada tanah pasir agak masam dan aluvial shale, dan tinggi pada tanah kapur (Chang dan Feng, 1959).

Proses pelepasan lambat kalium yang terjebak pada kisi-kisi mika pada bentuk illit dan vermikulit dengan adanya air dan mengembangkannya kisi-kisi liat disajikan pada Gambar 5. Kadar kation utama dalam tanah, yaitu K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} , bervariasi dan bergantung pada keadaan setempat. Percobaan padi di rumah kaca dengan larutan hara menunjukkan bahwa ke empat kation tersebut saling bersaing dan K^+ merupakan kompetitor yang paling efektif (Ismunadji dan Dijkshoorn, 1971). Dengan demikian, kadar kation di dalam tanaman tidak selamanya proporsional dengan di dalam tanah karena efek kompetisi.

Di lapangan sering dijumpai gejala kekurangan kalium pada tanaman padi pada tanah berkapur atau ber-pH tinggi. Hal ini menyebabkan perlunya diperhitungkan pemupukan kalium takaran tinggi di daerah semacam itu. Penelitian pada tanah berkapur di Wonogiri menunjukkan bahwa tanaman padi sangat tanggap terhadap pemupukan kalium (Ismunadji dkk., 1982).



Gambar 5. Pelepasan dan fiksasi kalium dalam tanah

4.6 Belerang (S)

Transformasi belerang pada tanah tergenang mencakup berbagai reaksi, yaitu mineralisasi senyawa organik belerang dengan pelepasan senyawa belerang anorganik, imobilisasi atau konversi senyawa belerang anorganik menjadi senyawa organik, reduksi sulfat atau senyawa organik lain menjadi sulfida, dan oksidasi belerang elemental dan senyawa belerang anorganik.

Dari berbagai reaksi tersebut, yang menonjol adalah reduksi sulfat menjadi sulfida dan konversi senyawa organik menjadi hidrogen sulfida. Hidrogen sulfida yang dihasilkan akan bereaksi dengan ion-ion logam berat di dalam tanah, seperti Fe^{2+} , Zn^{2+} , dan Cu^{2+} untuk menghasilkan senyawa sulfida yang tidak larut. Dengan demikian, ketersediaan belerang menjadi turun. Karena reduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} mendahului reduksi SO_4^{2-} , maka biasanya selalu ada ion Fe^{2+} waktu terbentuk hidrogen sulfida, yang dikonversi menjadi FeS tidak larut. Reaksi ini akan melindungi mikroba dan tanaman dari keracunan hidrogen sulfida. Pada tanah organik dan berpasir yang berkadar besi rendah, di mana besi menjadi tidak aktif dalam bentuk senyawa kompleks dengan bahan organik, FeS tidak terbentuk. Akibatnya, keracunan hidrogen sulfida dapat terjadi pada tanaman padi.

Pada tanah netral dan alkali, konsentrasi SO_4^{2-} sebesar 1.500 ppm dapat tereduksi menjadi nol dalam jangka waktu 6 minggu setelah penggenangan. Pada tanah masam, mula-mula terjadi peningkatan SO_4^{2-} yang larut, kemudian menurun secara lambat. Reduksi sulfat berjalan lambat pada tanah sulfat masam yang tergenang, meskipun tanah tersebut sangat masam.

Padi, seperti halnya tanaman lain, menyerap belerang terutama dalam bentuk sulfat. Reduksi sulfat menjadi sulfida pada tanah tergenang menurunkan ketersediaan belerang. Akan tetapi, tanaman padi dapat menyerap belerang

yang berada dekat perakaran dengan cara mengoksidasinya menjadi SO_4^{2-} (Engler and Patrick, 1975).

Terdapat sekitar delapan genus mikroba yang mereduksi sulfat menjadi sulfida, antara lain *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfomonas*, *Desulfobacter*, *Desulfosarcina*. Genus mikroba yang mengoksidasi sulfida menjadi sulfat antara lain adalah *Thiobacillus*, *Beggiatoa*, *Chlorobium*, dan *Chromatium* (Freney dan Boonjawat, 1983).

Akhir-akhir ini dilaporkan adanya kekurangan belerang pada padi sawah di berbagai daerah di Indonesia (Ismunadji dkk., 1975). Hal ini antara lain disebabkan oleh perubahan penggunaan urea dari amonium sulfat sebagai sumber pupuk nitrogen. Penelitian Ismunadji dkk. (1982) menunjukkan bahwa tanaman padi menyerap belerang relatif sedikit. Tanaman yang diberi 20 ppm S memberi hasil yang sama dengan yang diberi 160 ppm S. Kebutuhan belerang tanaman padi diperkirakan sama dengan kebutuhan fosfor. Tanaman padi relatif tahan terhadap kadar belerang tanah yang tinggi. Tanaman yang diberi 160 ppm S belum menunjukkan gejala keracunan. Serapan belerang meningkat dengan pemupukan belerang yang makin tinggi, namun efisiensi serapan belerang menurun.

Belerang yang diserap oleh tanaman padi berasal dari tanah dalam bentuk anorganik maupun organik, air irigasi, dan udara. Di daerah beriklim tropik seperti Indonesia, pelapukan tanah berjalan cepat karena suhu tanah dan curah hujan tinggi. Tanah umumnya masam dengan pH terendah di daerah-daerah dengan curah hujan tinggi, yang menyebabkan terjadinya pencucian basa dari profil, tanah dan anion Cl^- , NO_3^- , dan SO_4^{2-} ikut tercuci. Pearson *et al.* (1962) menunjukkan 90% basa yang larut dalam air tercuci sebagai sulfat dan yang tercuci sebagai khlorida dan nitrat berturut-turut hanya 6% dan 1%.

4.7 Silikon (Si)

Silikon (Si) ditemukan pada berbagai tanaman. Sampai sekarang sukar dibuktikan bahwa Si mutlak diperlukan oleh tanaman. Dari berbagai tulisan dapat disimpulkan bahwa Si berpengaruh terhadap (i) pertumbuhan tanaman padi, (ii) kesuburan tanah, dan (iii) meningkatkan resistensi tanaman padi terhadap penyakit.

Manfaat Si pada tanaman graminea, terutama padi dan tebu, diduga membuat bentuk daun yang tegak (tidak terkulai) sehingga efektif menangkap radiasi surya dan efisien dalam penggunaan hara N yang menentukan tinggi rendahnya hasil tanaman. Tanaman yang cukup Si memiliki daun yang terlapisi silikat dengan baik sehingga lebih tahan terhadap berbagai penyakit yang diakibatkan oleh fungi maupun bakteri seperti blas dan hawar daun bakteri

(HDB). Dengan adanya Si, batang tanaman menjadi lebih kuat dan kekar sehingga lebih tahan terhadap serangan hama penggerek batang, wereng cokelat, dan tanaman tidak mudah rebah. Silikon juga menyebabkan perakaran tanaman lebih kuat, intensif, dan menaikkan *root oxidizing power*, yaitu kemampuan akar mengoksidasi lingkungannya seperti ion fero (Fe^{2+}) menjadi feri (Fe^{3+}) sehingga pada tanah yang banyak mengandung besi, tanaman lebih tahan keracunan besi. Demikian pula halnya Mn^{2+} yang dalam jumlah banyak biasanya meracuni tanaman menjadi berkurang karena teroksidasi menjadi Mn^{4+} . Tanaman yang kekurangan Si banyak kehilangan air (transpirasinya tinggi), karena permukaan daunnya kurang terlindungi silikat sehingga tanaman mudah kekeringan. Pemberian Si menyebabkan tanaman lebih tahan kekeringan. Pada tanaman padi fase anakan hingga inisiasi malai, batas kritis kandungan Si pada daun <5%. Pada fase pemasakan gabah, tanaman yang kahat Si jeraminya mengandung <5% Si. Nilai optimal konsentrasi Si dalam jerami berkisar antara 8%–10%. Dalam tanah, batas kritis Si adalah 40 ppm (menggunakan pengeksrak 1 M Na-asetat buffer pH 4). Pemberian Si ke tanah menyebabkan hara P lebih tersedia.

Tanaman tanpa Si daunnya lemah dan melengkung ke bawah. Silikon meningkatkan pasokan oksigen ke akar dan sehingga meningkatkan kemampuan akar untuk beroksidasi. Selanjutnya, Si meningkatkan ketersediaan fosfor di dalam tanah dan menekan serapan besi dan mangan yang berlebihan sehingga mengurangi kemungkinan keracunan oleh kedua unsur tersebut (Okuda and Takahashi, 1965).

Konsentrasi Si pada larutan tanah relatif meningkat setelah tanah digenangi, kemudian menurun dan setelah beberapa bulan dapat lebih rendah dibandingkan dengan saat tanah digenangi (Ponnamperuma, 1972). Kelarutan silikon tidak bergantung pada pH dengan kisaran 2,0–8,0. Peningkatan kelarutan silikon di dalam tanah disebabkan oleh reduksi oksida besi (Fe^{3+}) berkadar air yang mengikat silikat dan pengaruh dioksida karbon terhadap aluminium silikat. Bentuk utama silikon di dalam tanah adalah $\text{Si}(\text{OH})_4$ (Ortho-asam salisilik, monomer atau bentuk monomer dari silika) yang dalam ekuilibrium dengan kuarsa (SiO_2). Tanah dengan kadar bahan organik tinggi, terlepas dari pH, meningkatkan konsentrasi silikon di dalam tanah (De Datta, 1981). Hal ini tidak berlaku untuk tanah gambut, di mana kadar silikon tanaman dari semua contoh yang diambil dari Sumatera dan Kalimantan berkadar silikon rendah (Ismunadji dan Damanik, 1984).

Silikat banyak terdapat pada lapisan epidermis di daun, pelepah daun, dan batang (Takahashi, 1995). Silikat diserap oleh akar, ditranslokasikan ke daun sehingga jaringan tersebut mengeras akibat Si. Serapan Si pada tanaman padi sebanyak 6 kali serapan K, 10 kali serapan N, 20 kali serapan P_2O_5 , dan 30 kali

serapan kalsium. Secara umum pemberian Si dapat memperbaiki fungsi fisiologi tanaman dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan hama, penyakit, dan terhadap kerebahan. Pengaruh pemberian Si lebih nyata bila diberikan pada stadia generatif (perpanjangan bakal bunga). Pemberian pada stadia vegetatif pengaruhnya tidak begitu besar terhadap komponen hasil padi. Penambahan Si pada tanaman padi dapat meningkatkan jumlah gabah per malai dan bobot gabah isi per rumpun (Takahashi, 1995). Peningkatan serapan Si dapat menjaga daun tetap tegak sehingga fotosintesis dari kanopi dapat meningkat sampai 10% (Cock dan Yoshida, 1970 dalam Yoshida, 1981).

4.8 Seng (Zn)

Turunnya konsentrasi seng merupakan kerugian bagi tanah tergenang. Defisiensi seng pada padi sawah banyak ditemukan di berbagai negara beriklim tropis dan sedang. Konsentrasi seng di dalam tanah umumnya turun setelah penggenangan. Patrick dan Reddy (1978) menyebutkan bahwa turunnya konsentrasi seng tersebut kemungkinan disebabkan oleh presipitasi $\text{Zn}(\text{OH})_2$ karena pH tanah meningkat oleh penggenangan, presipitasi ZnCO_3 karena akumulasi CO_2 oleh pelapukan bahan organik, dan presipitasi ZnS karena tanah sangat reduktif.

Mobilitas seng dipengaruhi oleh pH, adsorpsi, kadar liat, dan bahan organik tanah. Status kalsium, fosfat, dan berbagai reaksi di dalam tanah juga memengaruhi ketersediaan seng. Sebagai contoh, konsentrasi mangan yang tinggi menekan serapan dan translokasi seng. Kalsium dan magnesium juga memengaruhi serapan seng, tetapi pengaruhnya lebih lemah. Urutan gangguannya terhadap serapan dan translokasi seng adalah sebagai berikut (Giordano *et al.*, 1974):

- Tekanan terhadap serapan seng: $\text{Fe} = \text{Cu} \gg \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Ca}$
- Tekanan terhadap translokasi seng: $\text{Fe} = \text{Cu} \gg \text{Ca} > \text{Mn}$

Faktor lain yang memengaruhi ketersediaan seng pada tanah tergenang adalah fosfor. Defisiensi seng makin parah apabila kadar fosfor tanah tinggi. Hal ini mungkin disebabkan oleh terbentuknya senyawa kompleks seng dengan fosfor yang sukar larut. Defisiensi seng juga makin parah apabila tanah berkadar bahan organik tinggi. Peran bahan organik dalam hal ini berkaitan dengan reduksi tanah dan akumulasi dioksida karbon. Defisiensi seng banyak ditemukan pada tanah bereaksi netral sampai alkali, terutama pada tanah berkadar kapur tinggi.

4.9 Tembaga (Cu), Boron (B), dan Molibdenum (Mo)

Proses transformasi yang melibatkan tembaga, boron, dan molibdenum masih sedikit diketahui. Patrick dan Reddy (1978) menyebutkan bahwa reaksi kimia unsur ini pada tanah tergenang mirip dengan seng. Konsentrasi boron tanah relatif tetap setelah penggenangan, sedangkan konsentrasi molibdenum meningkat setelah tanah digenangi dan diduga karena peningkatan pH (Ponnamperuma, 1975).

4.10 Asam Organik

Asam humik dan asam fufik ditemukan pada semua kondisi tanah dan perairan (Hayes, 1984), terbentuk melalui proses mikrobiologi, enzimatis, dan kimia pada saat pelapukan bahan organik (Flaig *et al.*, 1975). Asam organik seperti asam asetat, propionat, butirat, dan format ditemukan pada tanah tergenang. Konsentrasi asam organik meningkat setelah tanah digenangi dan keracunan asam organik dapat terjadi pada tanah organik dan tanah dengan drainase buruk, terutama apabila tanah tersebut banyak mengandung bahan organik. Suhu tanah sangat berpengaruh terhadap pembentukan asam organik dan suhu rendah menyebabkan akumulasi asam organik sehingga keracunan asam organik lebih banyak terjadi di daerah bersuhu dingin.

Konsentrasi asam organik yang tinggi menghambat perpanjangan akar, respirasi, dan serapan hara. Keracunan asam organik hampir tidak ditemukan pada tanah dengan pH mendekati netral. Takijima dan Sakuma (1961) menyimpulkan bahwa konsentrasi asam organik tinggi dalam jangka waktu yang singkat setelah penggenangan dan sedikit sekali pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman padi. Kemasaman tanah yang rendah, kadar bahan organik yang tinggi, dan pembenaman bahan organik ke dalam tanah meningkatkan akumulasi asam organik di dalam tanah dan dapat menimbulkan keracunan pada tanaman padi.

4.11 Permasalahan pada Tanah Tergenang

4.11.1 Salinitas

Salinitas ditimbulkan oleh konsentrasi garam laut di dalam tanah terlalu tinggi. Ion utama garam tersebut adalah natrium, kalsium, magnesium, klorida, dan sulfat. Dari semua itu, garam natrium klorida paling dominan. Salinitas dapat timbul pada dua macam ekosistem, yaitu di pantai atau di daerah arid dan semi arid. Di pantai, salinitas ditimbulkan oleh intrusi atau genangan air laut

dengan pH yang kadang-kadang rendah. Di daerah arid dan semi arid, kerusakan tanaman padi karena salinitas terjadi di dekat saluran-saluran irigasi. Evapotranspirasi sangat tinggi di daerah semacam ini sehingga gerakan air menuju ke atas menyebabkan akumulasi garam di sekitar perakaran tanaman. Tanah salin semacam itu mudah diketahui dari kristal-kristal garam berwarna putih pada permukaan tanah dan sering ber-pH tinggi. Tanah salin umumnya berkaitan dengan pH lebih rendah dari 8,5 dan daya hantar listrik lebih tinggi dari 4 mmhos/cm pada suhu 25°C.

Tanaman padi toleran terhadap salinitas selama berkecambah, tapi sangat peka pada fase berdaun satu sampai dua. Toleransi tanaman padi terhadap salinitas meningkat selama pembentukan anakan dan fase pemanjangan batang dan menurun saat berbunga. Selama periode pemasakan kurang dipengaruhi oleh salinitas meskipun toleransinya dapat berbeda antarvarietas. Varietas padi yang toleran terhadap tanah salin di Cirebon, Subang, dan Serang adalah IR36, IR32, Atomita 2, dan Bayar Putih (Ismunadji, 1983). Hasil skrining 70 varietas padi sawah pasang surut di Kalimantan Selatan dengan genangan air laut berkadar garam tinggi (0,7%) hanya 40 varietas yang hidup 31 sangat peka (skor 9), dan 9 agak peka (skor 7). Varietas yang agak peka adalah Utut, Sajudin, Ketan Tarap, Ketan Kunang-kunang, Ketan Angsana, Ketan Tahun, Kencana Sanggung, Pucuk, dan Duyung (Anwarhan *et al.*, 1979). Varietas Dendang dan Lambur juga cukup toleran terhadap salinitas (Suprihatno dkk., 2007).

4.11.2 Keracunan Besi

Keracunan besi terjadi bila tanaman padi mengakumulasi besi dalam takaran tinggi. Hal ini sering kali berkaitan dengan kadar besi fero yang tinggi dalam larutan tanah. Batas kritis konsentrasi besi di dalam tanah beragam, bergantung pH, yaitu sekitar 100 ppm pada pH 3,7 dan 300 ppm pada pH 5,0. Gejala spesifik keracunan besi timbul bila kadar besi tanaman lebih dari 300 ppm. Konsentrasi besi yang tinggi di tanah menekan serapan hara lain, seperti fosfor dan kalium.

Timbulnya hidrogen sulfida dan fero sulfida pada tanah tergenang yang sangat reduktif merupakan penyebab timbulnya keracunan besi pada padi sawah. Status hara tanaman memengaruhi toleransi tanaman padi terhadap keracunan besi. Tanaman yang kekurangan kalium sering kali berkadar besi tinggi dan menunjukkan gejala keracunan yang parah. Varietas padi mempunyai kepekaan yang berbeda terhadap keracunan besi (Ponnamperuma, 1972). Skrining varietas di Cihea menunjukkan bahwa Pelita I/1 dan B9C-Md-3-3 lebih toleran terhadap keracunan besi daripada IR20, IR22, IR26, dan IR34 (Ismunadji dan Uexkull, 1977).

Keracunan besi banyak ditemukan di Indonesia, terutama di luar Jawa dengan gejala ringan sampai parah. Keracunan besi juga dilaporkan di negara

lain, seperti Srilanka, India, Malaysia, Filipina, Senegal, Sierra Leone, Liberia, dan Kolumbia (Ponnamperuma, 1976). Penyakit fisiologik ini dikenal dengan nama bronzing. Di Indonesia keracunan besi dikenal dengan berbagai nama seperti mentek, mutut, merah, atau abang. Tanaman padi yang keracunan besi memiliki daun berwarna kecokelatan, kekuningan, atau jingga, bergantung pada varietas dan tingkat keracunan. Dalam keadaan parah, tanaman kerdil dan mati sebelum sempat membentuk malai.

Ottow *et al.* (1982) melakukan survei keracunan besi pada tanaman padi di Asia Tenggara (termasuk Indonesia) dan Afrika. Dari survei tersebut disimpulkan bahwa keracunan besi adalah stres hara secara ganda. Keracunan besi ditemukan di daerah depresi dan tanah sulfat masam. Tanah-tanah tersebut mempunyai kapasitas tukar kation (KTK) dan kadar fosfor yang rendah, pH tanah berkisar antara 3,0–7,2, kadar besi 290 ppm–1000 ppm, kadar Mn sering lebih dari 1000 ppm, sedangkan kadar K, P, Ca, dan Zn rendah.

5. UNSUR HARA, HAMA, DAN PENYAKIT PADI

Ada hubungan antara status hara tanaman dengan timbulnya penyakit. Kadar nitrogen yang tinggi, kalium dan silikon yang rendah menyebabkan tanaman lebih peka terhadap infeksi patogen (Ismunadji, 1976). Penyakit bercak daun cokelat (*Heminthosporium oryzae*) pada tanaman padi dikenal indikatif untuk lahan yang kekurangan kalium.

Peran kalium untuk menurunkan tingkat serangan busuk batang telah dibuktikan melalui percobaan di Jakenan yang tanahnya berkadar kalium rendah. Tanggapan tanaman terhadap pemupukan kalium sangat nyata. Pada kondisi tanah berkadar K rendah, rendahnya produksi bukan hanya karena kekurangan kalium, tetapi juga karena penyakit busuk batang, seperti dapat dilihat pada Tabel 4 (Ismunadji, 1976).

Tabel 4. Hasil gabah dan tingkat kerusakan tanaman oleh penyakit busuk batang pada berbagai perlakuan pupuk.

Perlakuan pupuk (N-P-K)	Tingkat kerusakan (%)	Indeks hasil
0-0-0	47,0	100
0-60-60	0,3	104
120-0-60	7,2	163
120-60-0	69,2	66
120-60-30	23,3	146
120-60-60	4,4	187
120-60-90	2,3	202
120-60-120	1,8	173

Kiraly (1964) melaporkan pemupukan nitrogen pada takaran tinggi menurunkan kadar fenol dalam tanaman sehingga tanaman lebih peka terhadap penyakit. Matsuyama (1975) juga melaporkan bahwa pemupukan nitrogen takaran tinggi menghasilkan tanaman padi berkadar selulosa dan lignin rendah dan tanaman peka terhadap penyakit blas.

Tanaman padi yang berkadar silikon rendah lebih peka terhadap penyakit, seperti bercak daun cokelat dan blas, dan resistensinya meningkat dengan pemupukan silikon. Banyak yang berpendapat bahwa lapisan epidermis berkadar silikon tinggi menghambat penetrasi cendawan dalam tanaman sehingga untuk pertumbuhan yang sehat diperlukan nisbah SiO_2/N yang tinggi (Matsubayashi *et al.*, 1963). Tanaman yang dipupuk nitrogen takaran tinggi, sel epidermisnya berkadar silikon rendah sehingga lebih peka terhadap penyakit blas (Ou, 1972).

Penyakit blas yang disebabkan oleh cendawan *Pyricularia grisea* merupakan salah satu masalah utama dalam upaya peningkatan produksi, terutama padi gogo. Penyakit blas merusak tanaman padi mulai dari persemaian sampai pengisian bulir. Gejala penyakit blas dapat muncul pada daun, buku batang, dan leher malai. Secara umum ada dua jenis blas, yaitu blas daun yang merusak tanaman pada fase vegetatif dan blas leher malai yang merusak pada awal pembungaan (Bonman, 1992). Penularan blas yang serius pada fase vegetatif dapat menyebabkan matinya tanaman dan pada fase generatif dapat menyebabkan patahnya leher malai dan bulir padi jadi hampa (Ou, 1985). Patogen *Pyricularia grisea* mempunyai daur ganda (polisiklik) dengan kemampuan membentuk ras baru dalam waktu singkat. Varietas yang dinyatakan tahan harus mampu menghadapi banyak ras. Ketahanan tanaman padi terhadap penyakit blas dipengaruhi oleh gen ketahanan pada tanaman inang, patogenesitas cendawan *P. grisea*, dan faktor lingkungan (Ou, 1985). Ketahanan ini dapat dikendalikan oleh satu, beberapa, dan banyak gen. Satu gen dapat mengendalikan ketahanan ras tertentu, beberapa gen dapat mengendalikan beberapa ras dan banyak gen mengendalikan banyak ras (Takahashi, 1995).

Pertanaman padi di lapang selalu diserang oleh berbagai hama, di antaranya yang utama adalah penggerek batang padi (PBP). Ada empat jenis PBP yang ditemui di lapangan dan yang terbanyak yaitu penggerek batang padi kuning (PBPK). Larva PBPK menyerang tunas muda, serangan pada stadia tanaman vegetatif disebut sundep dan serangan pada stadia tanaman generatif disebut beluk. Serangan selama lima tahun terakhir, sejak tahun 2000–2005, berturut-turut 92.150 ha, 93.596 ha, 75.921 ha, 86.322 ha, 77.314 ha dan 89.617 ha. Berbagai upaya dilakukan untuk mengendalikan hama ini di antaranya dengan menggunakan insektisida. Pengendalian dengan insektisida merupakan cara konvensional dan akan berpengaruh terhadap serangga bukan sasaran serta mencemari lingkungan. Oleh sebab itu, selalu diupayakan alternatif

pengendaliannya. Berdasarkan hasil penelitian, pemberian senyawa Si dapat mengurangi serangan hama penggerek batang, termasuk PBPB. Larva yang memakan tanaman yang mengandung SiO_2 alat mulutnya akan aus sehingga tanaman akan terhindar dari serangannya. Senyawa SiO_2 ditemui pula dalam bentuk pupuk. Bila pupuk SiO_2 tersebut diaplikasikan pada tanaman, maka kandungan SiO_2 tanaman akan meningkat sehingga PBPB tidak menyukainya.

6. KAHAT DAN KERACUNAN HARA

Kahat dan keracunan hara banyak dilaporkan dari berbagai negara (Takana and Yoshida, 1975). Kadang-kadang kahat dan keracunan hara tersebut melibatkan lebih dari satu unsur hara atau bersifat ganda. Kahat atau keracunan hara yang banyak dijumpai pada tanaman padi sawah adalah kahat N, P, K, S, dan Zn; keracunan Fe, Mn, B, Al, sulfida, asam organik, dan dioksida karbon serta salinitas untuk garam Na. Perubahan sifat kimia tanah yang menyebabkan timbulnya kahat atau keracunan hara mengakibatkan tanaman padi tumbuh tidak normal, hasil rendah, dan dapat menyebabkan kegagalan produksi.

Informasi mengenai batas kritis kadar unsur hara tanaman padi, di mana kadar yang lebih rendah akan menimbulkan gejala kahat dan yang lebih tinggi akan menimbulkan gejala keracunan, merupakan hal yang sangat penting untuk

Tabel 5. Gejala kahat hara tanaman padi

Nitrogen	Tanaman kerdil dengan anakan terbatas. Daun hijau kekuningan, dan pucuk warnanya lebih hijau, daun sempit, pendek, dan tegak. Daun-daun tua cepat mati.
Fosfor	Tanaman kerdil dengan anakan terbatas. Daun sempit, pendek, tegak dan berwarna hijau tua. Daun-daun tua cepat mati. Warna kemerahan atau keunguan dapat timbul pada daun, apabila varietas padi tersebut cenderung membentuk antosyanin.
Kalium	Tanaman kerdil, anakan kadang-kadang tidak berkurang atau agak berkurang. Daun pendek, lemah sehingga cenderung melengkung ke bawah dan berwarna hijau tua atau hijau kebiruan. Pada daun bawah timbul warna kekuningan secara interveina yang dimulai dari ujung daun, kemudian mengering. Kadang-kadang timbul bercak-bercak cokelat pada daun terutama pada ujungnya.
Belerang	Gejala mirip dengan defisiensi nitrogen dan sering kali sukar membedakannya. Warna kuning lebih intensif pada daun-daun muda.
Kalsium	Daun pucuk agak putih, menggulung, keriting atau salah bentuk. Tanaman kerdil dan bila parah pucuknya mati.

Lanjutan.....

Tabel 5. Gejala kahat hara tanaman padi

Magnesium	Daun agak bergelombang dan melengkung ke bawah. Timbul gejala khlorosis interveinal pada daun bawah (tua). Jumlah anakan, tinggi tanaman kurang dipengaruhi.
Besi	Daun pucuk khlorotik dan agak putih. Tanaman kerdil, anakan terbatas.
Mangan	Tanaman kerdil, tapi jumlah anakan tidak dipengaruhi. Khlorosis interveina timbul dan dimulai dari ujung daun menuju ke dasar daun, kemudian menjadi nekrosis. Daun muda yang timbul pendek, sempit, berwarna hijau muda, atau khlorotik.
Seng	Tulang utama daun muda terutama bagian dasar, khlorotik. Tanaman tumbuh kerdil, tidak respons terhadap pupuk N, P, dan K. Warna cokelat timbul pada daun bawah, tumbuh kerdil. Anakan dapat terbentuk terus. Ukuran helaian daun lebih kecil, tapi seludang daun tetap. Di lapang, pertumbuhan yang tidak merata dan masak terlambat adalah spesifik untuk kekurangan seng. Defisiensi yang berat mengakibatkan tanaman padi tidak mampu membentuk bunga atau malai.
Boron	Tinggi tanaman berkurang. Ujung daun yang baru muncul putih dan menggulung seperti kekurangan kalsium. Pucuk mati, tapi anakan dapat terus terbentuk dan membentuk roset.
Tembaga	Warna daun hijau kebiruan, kemudian timbul khlorosis pada ujung daun. Khlorosis menjalar ke bawah pada kanan kiri tulang daun utama, diikuti dengan nekrosis pada ujung daun. Daun pucuk tidak mampu membuka dan mirip jarum atau kadang-kadang hanya bagian dasar daun yang membuka.

Tabel 6. Gejala keracunan hara tanaman padi

Besi	Bercak cokelat kecil-kecil timbul pada daun bawah, dimulai dari ujung daun dan menjalar ke dasar daun. Bercak-bercak tersebut kemudian saling bergabung. Daun-daun umumnya tetap hijau. Kadang-kadang daun-daun berwarna hijau kotor. Bila parah, daun-daun berwarna kecokelatan sampai cokelat kemerahan.
Mangan	Tanaman kerdil dengan anakan yang terbatas. Bercak-bercak cokelat timbul pada tulang daun dan tulang pelepah daun, terutama daun bawah.
Boron	Khlorosis timbul pada ujung-ujung daun tua, terutama tepi daun. Timbul bercak besar-besar cokelat tua berbentuk elips. Daun-daun kemudian mati.
Aluminium	Timbul khlorosis interveinal. Bagian yang khlorotik kemudian menjadi nekrosis dan berwarna kuning kecokelatan, dan daun mati.
Salinitas	Tanaman kerdil dengan anakan terbatas. Ujung daun agak putih, kadang-kadang timbul khlorosis pada daun.
Jodium	Bercak cokelat kecil-kecil timbul pada daun bawah (tua). Bercak tersebut menyebar ke seluruh permukaan daun dengan warna cokelat kekuningan atau cokelat. Daun-daun kemudian mati

Tabel 7. Tanah berpotensi defisiensi dan keracunan hara tinggi

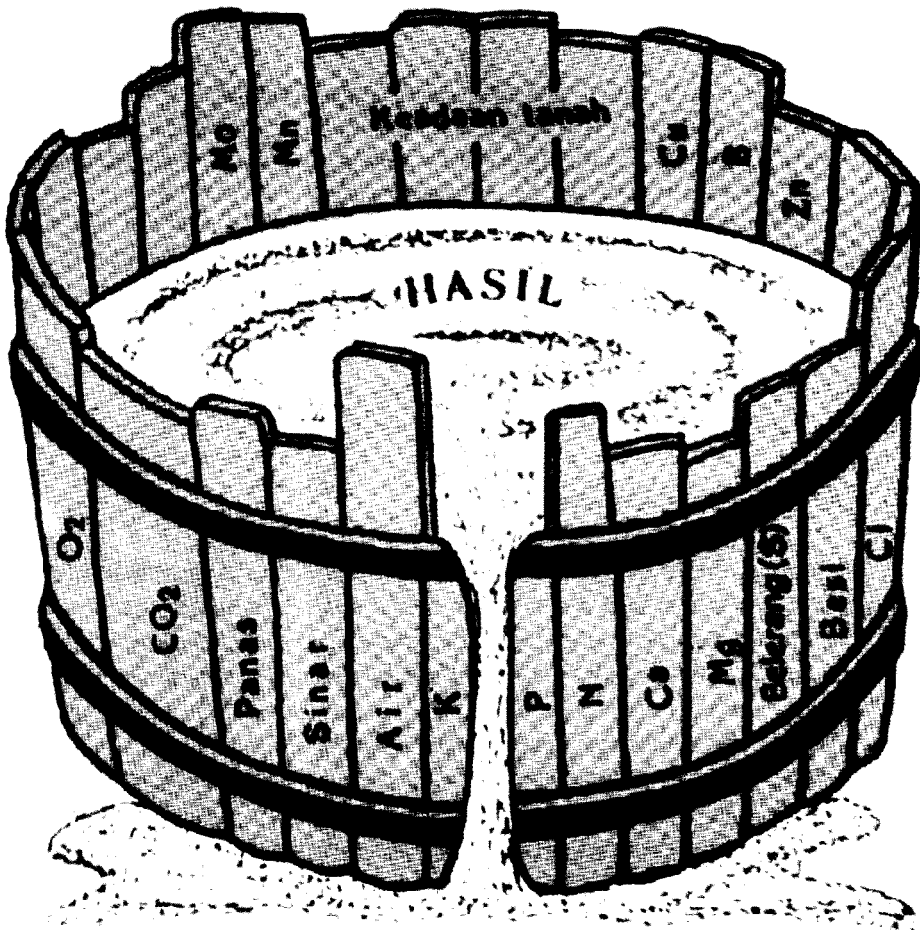
Kahat Nitrogen	Tanah berkadar P rendah, tergenang terus-menerus, dan kadar bahan organik rendah (<1% C). Tanah berpasir, alkalin (pH >7.0) dengan potensi volatilisasi NH_3 tinggi.
Kahat Fosfor	Tanah berpasir dengan bahan organik dan cadangan P rendah. Tanah masam di lahan kering di mana fiksasi P tinggi seperti tanah Podsolik Merah Kuning (Ultisols dan Oxisols). Tanah sawah yang telah terdegradasi. Tanah gambut, tanah sulfat masam di daerah pasang surut, tanah alkaline, dan tanah saline dengan pH >7,5.
Kahat Kalium	Tanah berpasir dengan KTK rendah dan cadangan K rendah. Tanah masam yang telah terdegradasi lanjut. Tanah di mana serapan K terhambat. Tanah sawah dengan jenis mineral liat 2: 1 (montmorilonit) atau fiksasi K oleh liat 2:1. Tanah dengan $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{K}$ rasio dalam larutan tinggi. Tanah sawah yang drainasenya buruk, serapan K terhambat oleh adanya Fe^{2+} dan asam-asam organik dan H_2S .
Keracunan Aluminium	Konsentrasi Al^{3+} berlebihan dalam larutan tanah. Tanah pada lahan kering atau lahan sawah dengan pH <5,0. Tanah sulfat masam di daerah pasang surut.
Salinitas	Lahan irigasi di mana irigasi tidak cukup. Daerah dengan evaporasi tinggi seperti Indonesia bagian timur. Air tanah mengandung garam tinggi atau intrusi air laut tinggi. Daerah-daerah pantai dengan pH >8,5 serta dengan nilai SAR (<i>Sodium adsorption Ratio</i> >15). Tanah sulfat masam yang mendapat pengaruh salin dari air pasang dan tanah-tanah salin berpasir.

menentukan apakah tanaman padi tumbuh normal. Batas kritis kadar unsur hara tanaman padi dapat ditentukan dengan analisis kimia tanaman tersebut. Gejala kahat, keracunan dan kondisi tanah potensi kahat maupun keracunan hara disajikan berturut-turut pada Tabel 5, 6, dan 7.

7. KONSEP EFISIENSI PEMUPUKAN

7.1 Hukum Minimum Liebig

Untuk pertumbuhannya, tanaman padi memperoleh zat hara yang bersumber dari dalam tanah atau pupuk yang ditambahkan. Perbaikan terhadap salah satu faktor pembatas pertumbuhan berakibat munculnya faktor kendala lain yang jumlahnya dalam kondisi minimum. Hubungan ini dikenal sebagai hukum minimum (*law of the minimum*) yang dikemukakan oleh Sprengel pada awal abad ke-19. Teori minimum ini sangat mendukung teori hasil tanaman yang digagas oleh Justus von Liebig yang menyatakan bahwa tingkat produksi tanaman ditentukan oleh ketersediaan unsur hara yang paling minimum, seperti diilustrasikan pada Gambar 7 (Mengel dan Kirkby, 1987). Perbaikan terhadap faktor yang menjadi penghambat pertumbuhan akan meningkatkan hasil tanaman dengan nilai



Gambar 6. Tingkat hasil suatu tanaman ditentukan oleh faktor pertumbuhan yang paling minimum sesuai hukum minimum Liebig's

peningkatan hasil yang semakin kecil. Penambahan input akan meningkatkan produksi tanaman hingga mencapai potensi hasilnya. Hal ini dikenal dengan teori *law of diminishing return*. Mitscherlich, 1954 (*dalam Mengel and Kirkby, 1987*) menuliskan hubungan ini dalam suatu persamaan matematis sebagai berikut.

$$y = A(1 - 10^{-cx})$$

di mana y = hasil, A = maksimum hasil, c = konstanta, X = faktor pertumbuhan

$$RN_{tn} = \sum (AP_t + AR_t - RM_t - L_t)$$

Di mana

RN_{tn} = hara anorganik dan organik tersisa dalam tanah pada waktu akhir (tn);

AP_t = hara anorganik dan organik yang terkandung dalam tanah pada waktu awal (t);

AR_t = hara anorganik dan organik yang ditambahkan ke dalam tanah dalam interval waktu (t);

RM_t = hara yang dijerap dan diangkut oleh tanaman dalam interval waktu (t);

L_t = hara anorganik dan organik yang hilang dalam interval waktu (t);

t = waktu awal;

tn = waktu akhir;

t = interval waktu (antara t dan tn).

Apabila nilai yang diperoleh:

$(RM_t - L_t) > (AP_t + AR_t) \Rightarrow$ terjadi penambangan hara

$(RM_t - L_t) < (AP_t + AR_t) \Rightarrow$ terjadi penabungan hara

7.2 Konsep Pemupukan Berimbang

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

Persamaan untuk pemupukan berimbang/keseimbangan hara tanah mengacu pada persamaan Follet *et al.* (1987), sebagai berikut.

8. STRATEGI PENGELOLAAN HARA KE DEPAN

Dengan memahami proses penyawahan dan konsekuensi yang terjadi apabila suatu tanah disawahkan maka dapat dibangun suatu teknologi untuk meningkatkan ketersediaan hara tanah. Berdasarkan kandungan hara di dalam tanah serta kebutuhan hara tanaman padi, maka dapat disusun suatu teknologi pemupukan berimbang spesifik lokasi yang efektif dan efisien dengan tujuan utama meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman.

Pemupukan secara lebih rasional dan berimbang adalah salah satu faktor kunci untuk dapat memperbaiki dan meningkatkan produktivitas lahan pertanian, khususnya di daerah tropika di mana kecukupan hara merupakan salah satu faktor pembatas. Penggunaan pupuk yang lebih rasional dan berimbang berarti harus memperhatikan kadar unsur hara di dalam tanah, jenis dan mutu pupuk,

dan keadaan pedo-agroklimat serta mempertimbangkan unsur hara yang diperlukan tanaman untuk pertumbuhan dan produksi optimum.

Pengembangan teknologi pemupukan spesifik lokasi untuk padi sawah dapat dilakukan melalui tiga pendekatan. Pertama, peta rekomendasi pemupukan didasarkan pada status hara tanah yang dibuat secara spasial di seluruh sentra pertanaman padi. Teknologi ini mudah diikuti oleh pengguna dan pengambil kebijakan, namun membutuhkan investasi yang tidak kecil untuk membuat Peta Rekomendasi Pupuk dengan skala yang detil. Pada saat ini telah disusun Peta Rekomendasi Pupuk P dan K di sentra produksi padi di 21 provinsi di Indonesia (Anonim, 2007).

Kedua, rekomendasi pemupukan spesifik lokasi dikembangkan berdasar *prescription farming* sesuai dengan kesuburan tanahnya. Pengguna/petani diharapkan secara aktif berkonsultasi dengan para petugas penyuluh pertanian untuk memeriksa atau menganalisis tanahnya di laboratorium (yang didirikan di Dinas Pertanian atau *mobile laboratory*). Berdasarkan hasil analisis tanah, akan dibuatkan rekomendasi dosis pemupukan spesifik lokasi untuk padi sawah.

Ketiga, mengembangkan suatu alat bantu (*soil test kit*) yang dapat digunakan secara mudah di lapangan untuk menentukan status hara tanah sebagai dasar penetapan rekomendasi pemupukan berdasar uji tanah. Dengan *soil test kit* yang dapat dioperasikan oleh para penyuluh, rekomendasi dosis pemupukan dapat ditetapkan di setiap areal lahan sawah yang dimintakan rekomendasinya.

9. PENUTUP

Dalam menghadapi tantangan ke depan dengan kelangkaan energi dan penurunan sumber daya lahan (tanah dan air) dari sisi kualitas dan kuantitas, sudah saatnya dilakukan antisipasi pengembangan teknologi yang mengarah pada efisiensi input usaha tani pertanian khususnya padi sawah.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldrich, S.R. 1980. Nitrogen in Relation to Food, Environment, and Energy. Special Publication 61. Agric. Exp. Sta. College of Agriculture, Univ. of Illinois, USA. p. 111–170.
- Anonim. 2007. Peta Rekomendasi Pupuk P dan K di 21 Provinsi Sentra Produksi Padi. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian.
- Anwarhan, H. *et al.* 1979. "Reaction of Tidal Swamp Rice Varieties to Salinity in South Kalimantan". In Proc., Intern. Deepwater Rice Workshop. Intern. Rice Res. Inst., Los Banos, Philippines.

- Bonman, J.M. 1992. "Durable Resistance to Rice Blast Disease Environmental Influences". *Euphytica*, 63: 115–123.
- Brinkman, R. 1970. "Ferrollysis, a Hydromorphic Soil Forming Processes". *Geoderma*, 3: 199–206.
- Broadbent, F.E. 1979. "Mineralization of Organic Nitrogen in Paddy Soils". In *Int. Rice Res. Inst. Nitrogen and Rice*. Los Banos, Philippines.
- Chang, S.C. 1976. "Phosphorus in Submerged Soils and Phosphorus Nutrition and Fertilization of Rice". In *ASPAC Food and Fertilizer Technology Center, The Fertility of Paddy Soils and Fertilizer Application for Rice*. Taipeh, Taiwan.
- Chang, S.C. and M.P. Feng. 1959. "Potassium in Soils of Taiwan". *Soils Fert. Taiwan* 1–10.
- Chaudhary, T.N. and B.P Ghildyal, 1969. "The Effect o Drying on Soil Strength Parameters". *Soil Sci. Am. Proc.*, 33: 641–644.
- Craswell, E.T. and P.L.G. Vlek. 1979. "Fate of Fertilizer Nitrogen Applied to Wetland Rice". In *Nitrogen and Rice*. *Int. Rice Res. Inst.*, Los Banos, Philiphines.
- Curfs, H.P.F. 1976. "System Development in Agricultural Mechanization". Wageningen: Agricultural University,
- De Datta, S.K. 1981. "Principles and Practices of Rice Production". John Willey (Ed.), Brisbane, Toronto: New York Chichester.
- De Datta, S.K. *et al.* 1966. "Phosphorus Supplying Capacity of Lowland Rice Soils". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30: 613–617.
- De Datta, S.K. *et al.* 1974. "Water and Nitrogen Economy of Rainfed Rice as Affected by Soil Puddling". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 515–518.
- Delaune, R.D. and W.H. Patrick Jr. 1970. "Urea Conversion to Ammonia in Waterlogged Soil". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 603–607.
- Dobermann, A. and T. Fairhurst. 2000. "Rice: Nutrient Disorder and Nutrient Management". International Rice Research Institute – Potash & Phosphate Institute (PPI)-Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC).
- Engler, R.M. and W.H. Patrick Jr. 1975. "Stability of Sulfides of Manganese, Iron, Zinc, Copper and Mercury in Flooded and Non-Flooded Soil". *Soil Sci.*, 119: 217–221.
- Eswaran, H. 1985. "Interpreting Physical Aspects of Wetland Soil Management from Soil Taxonomy". In *Soil Physics and Rice*. Los Banos: International Rice Research Institute.
- Flaig, W., H. "Bentelspacher and E. Rietz. 1975. Chemical Composition and Plapicol Properties of Humic Substances". In J. E. Gieseking (Ed.), *Soil components*, Vol. I. New York: Springer-Verlag.

- Follet, R.P. *et al.* 1987. Soil Conservation Practices: Relation to the Management of Plant Nutrient for Crop Production. Soil Sci. Soc. Amer. p. 29.
- Frenay, J.R. and J. Boonjawat. 1983. "Sulfur Transformations in Wetlands Soils". In G. J. Blair and A. R. Till (Ed.), Sulfur in South-East Asian and South Pacific Agriculture. Indonesia, May 23–27, 1983.
- Ghildyal, B.P. 1978. "Effect of Compaction and Puddling on Soil Physical Properties and Rice Growth". In Soil and Rice. Los Banos: International Rice Research Institute.
- Giordano, P.M. *et al.* 1974. "Zinc Uptake by Rice, as Affected by Metabolic Inhibitors and Competing Cations". Plant and Soil, 41: 637–646.
- Hardjowigeno, S. dkk 2004. "Morfologi dan Klasifikasi Tanah Sawah". Dalam: Fahmuddin, A. dkk (Ed.), Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Hlm. 1–28.
- Hayes, M.H.B. 1984. "Structures of Humic Substances". In Organic Matter and Rice. Int. Rice Res. Inst., Laguna, Philipines.
- Ismunadji, M. 1976. "Rice Disease and Physiological Disorders Related to Potassium Deficiency". In Fertilizer Use and Plant Health. p. 47–60. Proc. 12th Colloquium of Intern. Potash Inst., Ismir, Turkey.
- Ismunadji, M. 1983. "Crop Production in Acid Sulphate and Saline Soils in Indonesia". J. India Soc. Coastal Agric. Res., 1: 58–65.
- Ismunadji, M. and H.R. von Uexkull. 1977. "Potassium Responses of Some Paddy Soils in Java". Proc., Conf. on Classification and Management of Tropical Soils. Kuala Lumpur.
- Ismunadji, M. and M. Damanik. 1984. "The Nutrient Status of Tidal Swamp Rice in Kalimantan and Sumatera, Indonesia". In Organic Matter and Rice. Los Banos: The International Rice Research Institute.
- Ismunadji, M. and W. Dijkshoorn. 1971. "Nitrogen Nutrition of Rice Plants Measured by Growth and Nutrient Content in Pot Experiments". 1. Ionic Balance and Selective Uptake. Neth. J. Agric. Sci., 19: 223–236.
- Ismunadji, M. dkk 1982. "Potassium Nutrition of Lowland Rice". In E. Pushparajah and A. H. Sharifuddin (Ed.), Phosphorus and Potassium in the Tropics. The Malaysian Soc. of Soil Science, Kuala Lumpur.
- Ismunadji, M., dkk 1975. "Sulphur Deficiency of Lowland in Java". Contr. Centr. Res. Inst. Agric., 14: 1–17.
- Kiraly, Z. 1964. "Effect of Nitrogen Fertilization on Phenol Metabolism and Stem Rust Susceptibility of Wheat". Phytopath. Z. 51: 256–261.
- Kawaguchi, K. and K. Kyuma. 1977. "Paddy Soil in Tropical Asia". Honolulu: The University Press of Hawaii.

- Kyuma, K. 2004. "Paddy Soil Science". Kyoto University Press. Japan.
- Matsubayashi, M. *et al.* 1963. Theory Practice of Growing Rice. Tokyo: Fuji Publishing.
- Matsuyama, N. 1975. "The Effect of Sample Nitrogen Fertilizer on Cell Wall Materials and Its Significance to Rice Blast Disease". Ann. Phytopath. Soc. Japan, 41: 56–61.
- McLean, E.O. 1978. "Influence of Clay Content and Clay Composition on Potassium Availability". In Potash Research Institute of India. Potassium in Soils and Crops. New Delhi.
- Mengel, K. 1985. "Dynamic and Availability of Major Nutrients in Soil". Adv. Soil Sci., 2: 65–131.
- Mengel, K. and E.A. Kirkby. 1987. "Principles of Plant Nutrition". Bern: International Potash Institute.
- Mitsuchi, M. 1974. Characters of Humus Formed Under Rice Cultivation. Soil Sci. Plant Nutr. 20: 249–259.
- Moorman, F.R., and N. van Breemen. 1978. "Rice: Soil, Water, Land". Los Banos: International Rice Research, Institute.
- Munir, M. 1987. "Pengaruh Penyawahan terhadap Morfologi, Pedogenesis, Elektrokimia dan Klasifikasi Tanah". Disertasi Program Pasca Sarjana-IPB. Bogor.
- Okuda, A. and E. Takahashi. 1965. "The Role of Silicon". In The Mineral Nutrition of the Rice Plant. Baltimore: The John Hopkins Press.
- Ottow, J.C.G. *et al.* 1982. "Iron Toxicity of Rice as a Multiple Nutritional Soil Stress". Trop. Agric. Res., Series 15.
- Ou, S.A. 1972. "Rice Diseases". Kew, Surrey: Commonwealth Mycological Institute.
- Ou, S.H., 1985. "Rice Disease". Kew, Surrey: Commonwealth Mycological Institute.
- Patrick, W. H. Jr. and R.D. Delaune. 1972. "Characterization of the Oxidized and Reduced Zones in Flooded Soil". Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36: 573–576.
- Patrick, W.H. Jr. and I.C. Mahapatra. 1968. "Transformation and Availability to Rice of Nitrogen and Phosphorus in Waterlogged Soils". Adv. Agron., 20: 323–359.
- Patrick, W.H. Jr. C.N. Reddy. 1978. "Chemical Changes in Rice Soils". In Soils and Rice. Los Banos: Int. Rice Res. Inst.
- Pearson, R.W. *et al.* 1962. "Effect of Lime and Nitrogen Applications on Downward Movement of Calcium and Magnesium in Two Humid Tropical Soils of Puerto Rico". Soil Sci., 93: 77–82.

- Peng, S. and K.G. Cassman. 1994. "Exploiting Rice Yield Potential with Minimum Risk. The Promise of Physiologically-Based Nitrogen Management". IRRI Thursday Seminar Paper, 15 December, 1994. Los Banos: IRRI.
- Ponnamperuma, F.N. 1965. "Dynamic Aspects of Flooded Soils". In *The Mineral Nutrition of the Rice Plant*. Proc. Symp. at IRRI, Febr. 1964.
- Ponnamperuma, F.N. 1967. "A Theoretical Study of Aqueous Carbamate Equilibria". *Soil Sci.*, 103: 90–100.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. *The Chemistry of Submerged Soil*. Adv. Agron. 24: 29–96.
- Ponnamperuma, F.N. 1975. "Micronutrient Limitation in Acid Tropical Rice Soils". In E. Bornemisza and A. Alvarado (Ed.), *Soil Management in Tropical America*. Raleigh: North Caroline State University.
- Ponnamperuma, F.N. 1976. "Specific Soil Chemical Characteristics of Rice Production in Asia". IRRI Res. Pap. Series 2.
- Ponnamperuma, F.N. 1978. "Electrochemical Changes in Submerged Soils and the Growth of Rice". In *Soils and Rice*. Los Banos: Int. Rice Res. Inst.
- Ponnamperuma, F.N. *et al.* 1966. "Influence of Redox Potential and Partial Pressure of Carbon Dioxide on The pH Values and The Suspension Effect Of Flooded Soils". *Soil Sci.*, 101: 421–431.
- Ponnamperuma, F.N. *et al.* 1969. "Experimental Study of The Influence of The Partial Pressure of Carbon Dioxide on The Ph Values of Aqueous Carbonate Systems". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33: 239–241.
- Ponnamperuma, F.N. *et al.* 1973. "Amelioration of Three Acid Sulphate Soils for Lowland Rice". In *Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement, Acid Sulphate Soils*. Proc. Intern. Symp. on Acid Sulphate Soils, Wageningen.
- Prasetyo, B.H. dkk 2004. "Mineralogi, Kimia, Fisika, dan Biologi Lahan Sawah". In *Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya*. hlm. 29–75. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat.
- Prihar, R.R. *et al.* 1985. "Physical Properties of Mineral Soils Affecting Rice-Based Cropping Systems". In *Soil Physics and Rice*. p. 57–70. Los Banos: International Rice Research Institute.
- Redman, F.H. and W.H. Patrick Jr. 1965. "Effect of Submergence on Several Biological and Chemical Soil Properties". *Louisiana Agric. Exp. Sta. Bull.* 592.
- Sanchez, P.A. 1993. "Sifat dan Pengelolaan Tanah Tropika". Jilid 2. Bandung: Institut Teknologi.
- Sharma, P.K. and S.K. De Datta. 1985. "Effect of Puddling on Soil Physical Properties and Processes". p. 217–234. 57–70. In *Soil Physics and Rice*. Los Banos: International Rice Research Institute.

- Subagyono, K. dkk 2001. Effect of Puddling of Various Soil Types on Physical Properties of New Developed Irrigated Rice Areas in Indonesia.
- Suprihatno B. dkk 2007. Deskripsi varietas padi. Sukamandi: BB Padi.
- Takahashi, E. 1995. "Uptake Model and Physiological Functions of Silica". p. 420–433. In T. Matsuo, K. K. *et al.* (Ed.), Science of Rice Plant. Volume 2, Physiology. Tokyo: Food and Agriculture Research Center.
- Takana, A. and A.S. Navasero. 1964. "Loss of Nitrogen from The Rice Plant Through Rain or Dew". Soil sci. Plant. Nutr., 10: 36–39.
- Takana, A. and S. Yoshida. 1975. "Nutritional Disorders of The Rice Plant in Asia". International Rice Research Institute Techn. Bull. 10.
- Takijima, Y. and H. Sakuma. 1961. "Metabolism of Organic Acids in Soil of Peaty Paddy Field and Their Inhibitory Effect on The Growth of Rice Plant". Production of Organic Acids in Waterlogged Soil Treated with Green Manure and Its Relation to Growth Inhibition of Rice Seedlings. Part 7. J. Sci. Soil Manure Japan, 32: 559–564.
- Watanabe, I. *et al.* 1977. "Biological Nitrogen Fixation in Paddy Field Studied by in Situ Acetylene-Reduction Essays". IRRI Res. Paper Series 3.
- Wickman, T.H. and V.P. Singh. 1978. "Water Movement Through Wet Soils". In Soils and Rice. p. 337–358. Los Banos: International Rice Research Institute.
- Willet, I.R. 1985. "The Reduction Dissolution of Phosphate Ferrihydrite and Strengite". Aust. J. Soil Res., 23: 237–244.
- Willet, I.R. 1989. "Causes and Prediction of Changes in Extractable Phosphorus During Flooding". Aust. J. Soil Res., 27: 45–54.
- Yoshida, S. 1981. "Fundamentals of Rice Crop Science". Los Banos: International Rice Research Institute.