



Kesuburan Tanah dan Pemupukan



Riwandi, Prasetyo, Hasanudin, Indra Cahyadinata



BAHAN AJAR

# Kesuburan Tanah dan Pemupukan

RIWANDI, PRASETYO,  
HASANUDIN, INDRA CAHYADINATA



Penerbit:  
**Yayasan Sahabat Alam Rafflesia**  
JI Raya Lempuing Kota Bengkulu Phone: +62 852 7378 9888 (WA)  
Email: [salamrafflesia@gmail.com](mailto:salamrafflesia@gmail.com) Site : [www.salamrafflesia.id](http://www.salamrafflesia.id)



# BAHAN AJAR

## KESUBURAN TANAH DAN PEMUPUKAN

ISBN 978-602-5483-39-4



9

786025

483394



**BAHAN AJAR**  
**KESUBURAN TANAH DAN**  
**PEMUPUKAN**

*Riwandi, Prasetyo, Hasanudin, Indra Cahyadinata*

**Penerbit:**  
**Yayasan Sahabat Alam Rafflesia**

# BAHAN AJAR

## KESUBURAN TANAH DAN PEMUPUKAN

Penulis : Riwandi, Prasetyo, Hasanudin, Indra Cahyadinata  
ISBN : 978-602-5483-39-4

Penyunting : Ali Munawar  
Layout : Suhendra  
Desain Sampul : Suhendra

Cetakan ke-1.

Yayasan Sahabat Alam Rafflesia , 2017 xi, 153hlm.

Diterbitkan pertama kali oleh:

**Yayasan Sahabat Alam Rafflesia**

Jl Raya Lempuing Kota Bengkulu, Phone (sms): +62 852 7378 9888

(WA)/ +62 857 5811 5868 Email: [salamrafflesia@gmail.com](mailto:salamrafflesia@gmail.com)

Site : [www.salamrafflesia.id](http://www.salamrafflesia.id) dan [www.penerbitsalam.com](http://www.penerbitsalam.com)

Undang-Undang No. 19 tahun 2002

tentang Perubahan atas Undang-Undang No. 12 tahun 1997

Pasal 44 tentang Hak Cipta

Pasal 72

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan dan memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling singkat 1 (satu) bulan/atau denda paling sedikit Rp 1.000.000,00 (satu juta rupiah)
2. Barangsiapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

# **BAHAN AJAR**

## **KESUBURAN TANAH DAN PEMUPUKAN**

Dibiayai Oleh DIPA Kemenristekdikti No. 042.06-0/2016 Sesuai Dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian Bagi Dosen Universitas Bengkulu Tahun Anggaran 2016 No. 911/UN30.15/LT/2016



# KATA PENGANTAR

Puji dan syukur ditujukan kepada Allah SWT yang telah memberikan kekuatan untuk menulis bahan ajar dengan judul: Kesuburan Tanah dan Pemupukan. Mata kuliah ini wajib bagi mahasiswa Program Studi Ilmu Tanah dan Agroekoteknologi, Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu pada semester V.

Bahan ajar ini ditulis untuk memenuhi kebutuhan pengajaran pada mata kuliah Kesuburan Tanah dan Pemupukan (AGT-320) yang sumber pustakanya banyak ditulis dalam bahasa asing dan jumlahnya terbatas. Tulisan ini didasarkan pada urutan tatap muka di kelas sehingga mahasiswa dapat mempelajari materi perkuliahan sebelum materi tersebut disampaikan. Dengan demikian, diharapkan akan terjadi interaksi yang baik antara pengajar dan mahasiswa. Materi yang ditulis merupakan kompilasi dan/atau rangkuman dari bahan pustaka yang digunakan pada kegiatan perkuliahan dan hasil penelitian penulis selama 10 tahun terakhir.

Bahan ajar ini didasarkan kepada pengalaman mengajar dan meneliti sejak tahun 2003 sampai dengan sekarang. Pengalaman mengajar banyak membantu

untuk menuangkan ide/gagasan/pendapat yang timbul karena belajar dari pustaka, dan pengalaman meneliti banyak membantu untuk mengurai persoalan yang timbul. Penelitian di bidang pertanian termasuk budidaya tanaman karet dan pemupukannya banyak membantu menerangkan peristiwa yang terjadi di kebun karet. Bab pemupukan tanaman karet ini adalah bagian penting dari bahan ajar ini. Produksi getah karet sangat ditentukan oleh jenis, dosis/takaran, dan cara memupuk di kebun karet.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) Kemenristekdikti Jakarta, Rektor Universitas Bengkulu (Unib), Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Unib, Dekan Fakultas Pertanian Unib, Ketua Jurusan Budidaya Pertanian, Ketua Laboratorium selingkung Unib yang telah memberikan kepercayaan untuk menulis bahan ajar ini. Bahan ajar ini berupa draft artinya belum sempurna penulisannya baik bab-bab dan uraian lengkap sehingga masih sangat terbuka untuk direvisi sesuai dengan perkembangan ilmu dan pengetahuan pada masa yang akan datang. Oleh karena itu, kritik dan saran perbaikan dari pembaca sangat diharapkan.

Bengkulu, Oktober 2017

Penulis

# DAFTAR ISI

	Halaman
Kata Pengantar.....	v
Daftar Isi .....	vii
Daftar Gambar .....	ix
Daftar Tabel.....	xi
I. Pengertian & Sejarah Kesuburan Tanah.....	1
1.1 Pengertian.....	1
1.2 Sejarah Kesuburan Tanah Sampai Akhir Zaman Romawi .....	3
1.3 Kesuburan Tanah Menjelang Abad XIX .....	7
1.4 Kemajuan Penelitian Kesuburan Tanah Selama Abad XIX.....	11
1.5 Perkembangan Kesuburan Tanah di USA...	15
II. Tanah sebagai Medium Penyedia Unsur Hara Tanaman .....	17
III. Mekanisme Ketersediaan Unsur Hara dalam Tanah.....	54
3.1 Definisi .....	54
3.2 Koloid Tanah.....	55
3.3 Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) Tanah .	57
3.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Unsur Hara.....	61
IV. Sifat, Perilaku, Mekanisme Serapan, dan Peranan Unsur Hara dalam Tanaman.....	72

4.1 Sifat dan Perilaku Unsur Hara.....	72
4.2 Nitrogen (N) dalam tanah .....	75
4.3 Fosfor (P) dalam tanah.....	80
4.4 Kalium (K) dalam tanah .....	84
4.5 Belerang (S) dalam tanah.....	87
4.6 Besi (Fe) dalam tanah .....	90
4.7 Mangan (Mn) dalam tanah.....	91
4.8 Tembaga (Cu) dalam tanah.....	91
4.9 Seng (Zn) dalam tanah.....	92
4.10 Molibdenum (Mo) dalam tanah .....	94
4.11 Boron (B) dalam tanah .....	94
4.12 Khlor (Cl) dalam tanah .....	95
4.13 Mekanisme Serapan .....	96
4.14 Peranan, Kahat, dan Toksik Unsur Hara dalam Tanaman .....	101
V. Faktor-faktor Penentu Kesuburan Tanah.....	110
5.1 Faktor - faktor Penentu Kesuburan Tanah	110
VI. Evaluasi Kesuburan Tanah.....	123
VII. Konsep Pemupukan .....	132
7.1 Pengertian.....	132
7.2 Unsur Hara Esensial.....	134
7.3 Peranan dan Gejala Kahat Unsur Hara Esensial.....	136
7.4 Pupuk Kompos dari Limbah Karet.....	138
Referensi .....	144
Profil Penulis.....	149

# Daftar Gambar

	Halaman
Gambar 1a. Siklus nitrogen dalam tanah.....	25
Gambar 1b. Siklus nitrogen dalam tanah .....	25
Gambar 2. Penyematan N pada bintil akar kacang Pea dengan bakteri <i>rhizobium spp</i> .....	30
Gambar 3. Siklus P tanah .....	34
Gambar 4. Siklus S dalam tanah .....	37
Gambar 5. Cendawan tanah .....	41
Gambar 6. Cendawan kayu .....	41
Gambar 7. Jasad hidup umumnya ditemukan dalam tanah .....	44
Gambar 8. Mineral klei kaolinit tipe 1:1 .....	46
Gambar 9. Mineral klei montmorilonit tipe 2:1 .....	47
Gambar 10. Lapisan Ganda Baur dan Distribusi Kation dan Anion di Permukaan Klei .....	57
Gambar 11. Kapasitas Pertukaran Kation Tanah ...	58
Gambar 12. Larutan tanah .....	60
Gambar 13. Hubungan antara pH tanah dan Ketersediaan Unsur Hara dan Aktifitas Jasad Renik Tanah .....	63
Gambar 14. Siklus K dalam tanah .....	86
Gambar 15. Siklus Ca dan Mg .....	88
Gambar 16. Pengikatan $Zn^{+2}$ oleh mineral oksida hidroksida Fe .....	93

Gambar 17. Valmanocin K komplek .....	97
Gambar 18. Nonactin K komplek .....	98
Gambar 19. Sel mesofil .....	100
Gambar 20. Struktur humus tanah .....	112
Gambar 21. Hubungan antara konsentrasi unsur hara tanah dan hasil tanaman .....	130
Gambar 22. Timbunan limbah karet dari pabrik pengolahan karet milik PT Perkebunan Nusantara VII Padang Plawi, Bengkulu...	139
Gambar 23. Pengambilan limbah karet .....	140
Gambar 24. Fermentasi limbah karet dengan metode indore .....	142
Gambar 25. Pengayakan pupuk kompos .....	142
Gambar 26. Pengambilan cuplikan pupuk kompos untuk dianalisis di laboratorium	143

# Daftar Tabel

	Halaman
Tabel 1. Komposisi unsur hara dalam pupuk organik .....	66
Tabel 2. Estimasi jumlah N <sub>2</sub> yang disemat secara asosiasi hidup bebas dan simbiotik .....	78
Tabel 3. Rata-rata komposisi kimia kerak bumi pada kedalaman tanah 16 km .....	89
Tabel 4. Nilai potensial elektron terukur (E <sub>m</sub> ) dan terhitung (E <sub>cal</sub> ) dan tenaga penggerak (E <sub>d</sub> ) pada percobaan penyerapan ion pada <i>Nitella translucens</i> .....	99
Tabel 5. Hubungan antara indeks analisis tanah dan tanggap tanaman .....	126
Tabel 6. Hasil analisis laboratorium sampel limbah karet dari pabrik pengolahan limbah karet di PT Perkebunan Nusantara VII Padang Plawi, Bengkulu, Indonesia ...	138





# I. Pengertian & Sejarah Kesuburan Tanah

## 1.1 Pengertian

Beberapa istilah yang penting dalam mempelajari kesuburan tanah, yaitu produktivitas tanah potensial dan aktual, *law of the deminishing return*, batas kritis, batas optimum, unsur hara, kahat dan toksisitas unsur hara, ketersediaan dan ketidaktersediaan unsur hara, sifat, watak, dan ciri tanah.

Kesuburan tanah ialah kemampuan tanah untuk menyediakan unsur hara dalam jumlah berimbang guna pertumbuhan dan produksi tanaman (Nyakpa dkk 1988). Produktivitas tanah potensial adalah kemampuan tanah untuk menghasilkan pertumbuhan dan hasil biomassa tanaman tanpa asupan bahan (pupuk, air, dan pestisida) dari luar, tetapi belum tercapai. Produktivitas tanah aktual adalah kemampuan tanah untuk menghasilkan pertumbuhan dan hasil tanaman yang sekarang ada. *Law of the deminishing return* adalah peraturan yang

menyatakan bahwa hasil pertanian ditentukan oleh faktor pertumbuhan tanaman yang berada paling rendah termasuk di dalamnya konsentrasi unsur hara bagi tanaman. Batas kritis unsur hara adalah konsentrasi unsur hara yang menyebabkan pertumbuhan atau hasil tanaman cenderung semakin menurun semakin bertambahnya konsentrasi unsur hara. Peneliti menyatakan bahwa bila pertumbuhan atau hasil tanaman relatif yang dicapai <90%, maka dikatakan pertumbuhan atau hasil tanaman mulai kritis, artinya tanaman telah jenuh dengan konsentrasi unsur hara atau faktor pertumbuhan yang lainnya (air, udara, dan pestisida). Batas optimum adalah konsentrasi unsur hara yang menyebabkan pertumbuhan atau hasil tanaman relatif maksimum. Kahat unsur hara adalah keadaan tanaman yang kekurangan unsur hara esensial sehingga pertumbuhan atau hasil tanaman terhambat. Toksisitas unsur hara adalah keadaan tanaman yang kelebihan unsur hara esensial sehingga pertumbuhan atau hasil tanaman terhambat, dan bila terus menerus terjadi dapat menyebabkan tanaman mati. Ketersediaan unsur hara adalah konsentrasi unsur hara yang siap tersedia di dalam larutan tanah bagi tanaman. Ketidaktersediaan unsur hara adalah konsentrasi unsur hara yang tidak siap diserap tanaman, kemungkinan unsur hara terikat oleh mineral klei dan bahan organik tanah. Sifat (*properties*) tanah adalah keadaan yang melekat

pada diri tanah, misalnya masam, padat, dan lembab. Watak (*behavior*) tanah adalah perilaku tanah yang dihasilkan dari konsekuensi sifat tanah yang ada. Misalnya, tanah masam memberikan perilaku tanah kurang subur, dan mengandung Aluminium dan Hidrogen yang tinggi. Tanah padat sulit meloloskan air dari permukaan tanah ke lapisan tanah bawah, sehingga rentan erosi tanah. Tanah lembab mengandung lengas tanah yang cukup untuk pertumbuhan tanaman. Ciri (*characteristics*) tanah adalah atribut tanah yang menunjukkan mutu tanah. Misalnya, tanah hitam mencirikan tanah mengandung bahan organik yang banyak sehingga mutu tanah baik.

## **1.2 Sejarah Kesuburan Tanah Sampai Akhir Zaman Romawi**

Perkembangan Kesuburan Tanah dimulai dari zaman batu, zaman revolusi hijau, dan zaman moderen. Juga perkembangan Kesuburan Tanah berlangsung di benua Amerika Serikat dan benua Eropa. Pada zaman batu, manusia hidup dari alam. Mereka mencari makanan, minuman, dan kayu-kayuan. Makanan diperoleh dari buah-buahan, hewan buruan, ikan, dan hijauan tanaman. Minuman didapat dari air hujan, sungai, dan danau. Kayu-kayuan diambil dari pohon-pohon yang tumbuh di hutan untuk kebutuhan kayu bakar dan gubuk mereka. Mereka berpengalaman dimana makanan, minuman, dan kayu-kayuan dapat diperoleh dengan cepat, sehat,

dan aman bagi diri mereka. Pola hidup mereka berpindah-pindah dari suatu tanah yang subur ke tanah subur yang lain setelah tanah yang ditinggalkan tidak memberikan hasil bercocok tanam. Pertanian mereka dikenal dengan pertanian subsisten (*subsistence cultivation*).

Pola hidup yang baru mereka berpindah dari pertanian subsisten ke pertanian menetap di suatu tempat. Keluarga, sanak saudara, dan kampung-kampung mulai berkembang dan mereka mulai bercocok tanam menetap. Permulaan peradaban pertanian di Mesopotamia tahun 2500 SM, dikenal dengan Irak sekarang. Letaknya diantara sungai Tigris dan Euprat yang tanahnya subur, setiap biji tanaman dapat tumbuh 86 s.d 300 biji. Tahun 500 SM ahli sejarah Yunani mengunjungi Irak, Herodotus namanya. Beliau melaporkan bahwa produksi pertanian di Irak sangat tinggi, karena mereka telah mengenal irigasi dan tanahnya yang subur berasal dari endapan banjir sungai-sungai di sekitarnya. Tahun 300 SM Teopratus menulis dan melaporkan bahwa kesuburan tanah aluvial sungai Tigris dibentuk dari endapan debu dari genangan sungai.

Xenopon (434-355 SM) melaporkan bahwa perkebunan mengalami kegagalan tanpa diberi pupuk kandang, dan beliau menganggap bahwa pupuk kandang dapat menyuburkan tanah. Teopratus (372-287 SM) juga melaporkan bahwa bahan kompos

dianjurkan untuk pupuk tanah yang kurang/tidak subur. Berhati-hati dalam penggunaan kompos terhadap tanah yang subur. Dianjurkan untuk membuat lubang-lubang penampungan kotoran dan air seni binatang untuk disimpan lama dan dapat menjadi pupuk bermutu. Teopratus juga berpendapat bahwa tanaman membutuhkan air yang banyak. Petani menggunakan air yang mengandung pupuk kandang terlarut untuk memupuk tanaman anggur.

Teopratus juga menggolong-golongkan pupuk kandang berdasarkan kesuburannya, yaitu mulai dari paling subur sampai dengan tidak subur, manusia, babi, kambing, biri-biri, lembu betina, lembu jantan, dan kuda. Varro juga melaporkan bahwa kotoran ayam dan burung lebih subur daripada tinja manusia. Columell menganjurkan lembu diberi makan sejenis tanaman kacang dari genus *Trifolium*, karena dapat mempersubur kotoran lembu.

Pupuk hijau telah dikenal orang dapat menyuburkan tanah, terutama dari leguminosae. Teopratus mencatat bahwa sisa-sisa tanaman kacang (*Vicia faba*) ditanam ke dalam tanah pada saat pengolahan tanah dilakukan petani Macedonia dan Tessalia. Beliau melaporkan bahwa kendati tanaman ditanam rapat dan menghasilkan biji-bijian yang memuaskan, tetapi tanah tetap subur, karena adanya peranan bakteri bintil akar.

Cato (234-149 SM) merekomendasikan menanam tanaman sela acinum pada lahan tanaman anggur yang kurang subur tanahnya. Mungkin yang dimaksud dengan tanaman acinum adalah kacang-kacangan. Pertanaman campuran telah dikenalkan dapat meningkatkan produktivitas tanah. Juga dilaporkan bahwa leguminosae yang terbaik adalah kacang-kacangan, lupina, dan vetch (astragalus). Lupina adalah leguminosae yang terpopuler di zaman itu.

Pupuk mineral juga dikenalkan atau pembenah tanah (*soil amendment*) oleh Teopratus. Beliau mencampur tanah dengan tanah yang lain berbeda sifatnya untuk memperbaiki kekurangan suatu tanah. Pencampuran tanah subur ke tanah yang tidak subur dapat meningkatkan kesuburan tanah terakhir, dan pencampuran tanah dapat menginokulasi bakteri bintil akar ke tanah yang lain. Pencampuran tanah kasar ke tanah halus memperbaiki hubungan air dan udara tanah.

Penggunaan napol (bahan mengandung kapur) dikenalkan bangsa Aegina dan Yunani untuk lahan pertanian. Bangsa Romawi mengembangkannya dan merekomendasikan bahan kapur untuk berbagai macam tanaman biji-bijian dan rumput ternak. Plinneeus (62-113 SM) mengatakan bahwa bahan kapur disebar di permukaan tanah merata dalam waktu cukup lama untuk meningkatkan kesuburan tanah.

Sendawa ( $\text{KNO}_3$ ) adalah bahan pupuk tanaman. Tanaman palma membutuhkan garam asin yang banyak. Petani-petani menggunakan air garam pekat di sekitar batang pohon palma/kelapa.

Warna juga dapat menunjukkan kesuburan tanah. Peneliti ketika itu mengatakan bahwa tanah-tanah hitam adalah subur, sedangkan tanah pucat atau kelabu tidak subur atau kesuburannya rendah. Columella membantahnya, dia menunjukkan bahwa tanah gambut (warna hitam) tidak subur, dan tanah pucat di Lybia mempunyai kesuburan tanah yang tinggi. Beliau menduga bahwa struktur tanah, tekstur tanah, dan keasaman tanah adalah petunjuk yang berguna untuk menduga kesuburan tanahnya.

### **1.3 Kesuburan Tanah Menjelang Abad XIX**

Setelah kerajaan Romawi runtuh, sangat sedikit publikasi perkembangan pertanian sampai dengan Pietro de Crescenzi (1230-1307 M) menerbitkan buku berjudul: *Opus ruralium commodorum*, berisi masalah pertanian lokal. Beliau dianggap bapak agronomi moderen. Setelah itu perkembangan ilmu pengetahuan kesuburan tanah menjadi sangat lambat sampai dengan Palissy (1563 M) mengatakan bahwa kandungan abu tanaman adalah bahan yang diangkut dari dalam tanah.

Francis Bacon (1561-1624 M) mengatakan bahwa makanan utama tanaman adalah air. Beliau percaya bahwa setiap tanaman mengambil zat dari

dalam tanah untuk makanannya, dan tanaman dapat tegak berdiri di atas tanah.

Jan Baptiste van Helmont (1577-1644 M), ahli fisika dan kimia bangsa Belanda melaporkan bahwa air adalah unsur hara untuk pertumbuhan tanaman. Percobaan beliau sebagai berikut: Tanaman willow muda 2,5 kg ditanam pada tanah 100 kg di dalam pot, percobaan ini dipelihara dan hanya diberi air hujan, atau air suling. Percobaannya 5 tahun, setelah itu dipanen dan ditimbang berat tanaman willow 84,65 kg dan berat tanahnya 98,8 kg, kehilangan tanah 0,2 kg. Disimpulkan bahwa air adalah satu-satunya makanan yang diperoleh tanaman willow. Kehilangan tanah 0,2 kg adalah kesalahan percobaan.

Sekarang ini  $\text{CO}_2$  dan unsur hara tanah diperlukan tanaman sebagai nutrisi. Perlu sekali diingat bahwa penelitian ini bermula dari belum banyak diketahuinya hal ihwal nutrisi dan fotosintesis tanaman. Hasil kerja van Helmont sangat bernilai untuk membuka cakrawala penelitian yang lebih luas, meskipun kesimpulan yang diambilnya salah.

Pekerjaan van Helmont diulang kembali Robert Boyle (1627-1691 M) dari Inggris. Hasil penelitian Robert Boyle bahwa tumbuh-tumbuhan mengandung sejumlah garam-garam, spiritus, minyak yang semuanya dibentuk dari molekul-molekul air.

Glauber (1604-1668 M) mengatakan bahwa sendawa ( $\text{KNO}_3$ ) sebagai penyusun utama vegetasi

bukan air. Beliau mengumpulkan garam-garam berasal dari tanah kandang lembu, dan garam-garam itu berasal dari kotoran dan air seni lembu, dan lembu memakan rerumputan, berarti garam-garam itu berasal dari rerumputan. Beliau mencobakan garam-garam untuk pertumbuhan tanaman, hasilnya adalah terjadi peningkatan pertumbuhan tanaman. Kesimpulan beliau bahwa kesuburan tanah dan pupuk kandang ditentukan oleh sendawa ( $KNO_3$ ). Pendapat beliau ini didukung oleh John Mayow (1643-1679 M).

John Woodward (1700 M) mencoba mengulangi percobaan yang dilakukan Boyle dan van Helmont. Beliau menanam *spearmint* dalam contoh air dari air hujan, air sungai, air limbah, dan campuran air limbah dengan seresah. Beliau menghitung jumlah air yang hilang lewat transpirasi dan mencatat berat tanaman awal dan akhir percobaan. Kesimpulannya bahwa pertumbuhan spearmint sebanding dengan jumlah zat yang terdapat dalam air dan bahan tanah adalah penyusun utama vegetasi. Meskipun kesimpulannya belum benar, tetapi hasil penelitiannya telah memberikan andil yang besar untuk kemajuan ilmu. Teknik percobaannya jauh lebih maju daripada rekan-rekannya.

Menjelang akhir abad XVIII, Arthur Young (1741-1820 M) mencoba menanam barley (padi-padian) pada media pasir yang ditambah arang, minyak kereta api, kotoran ayam, spiritus dari anggur, nitrat, mesiu

senjata, empelur, dan kulit kerang. Hasilnya dari beberapa bahan yang ditambahkan dapat menumbuhkan tanaman barley, tetapi yang lainnya tidak dapat. Hasil penelitiannya dituang ke dalam buku: *Annals of Agriculture*, 46 volume dan berpengaruh besar terhadap kemajuan pertanian di Inggris.

Tulisan-tulisan pada abad XVII dan XVIII mencerminkan gagasan-gagasan bahwa tetumbuhan dibangun dari satu zat saja. Titik berat penelitiannya adalah apa yang sesungguhnya menyusun tanaman dan darimana asalnya.

Menjelang penutupan abad XVIII, Francis Home mengatakan bahwa bukan satu zat saja yang menyusun jaringan tanaman, mungkin lebih dari satu seperti air tanah, zat berasal dari udara, garam-garam, dan minyak. Home mengatakan bahwa masalah pertanian adalah masalah unsur hara esensial untuk pertumbuhan tanaman. Hasil penelitian beliau dianggap sebagai batu loncatan menuju pertanian ilmiah.

Priestley (1775 M) menemukan Oksigen sebagai kunci pembuka rahasia dari sejumlah pertanyaan mengenai *Mystery of plant life*. Jan Ingenhousz (1730-1799 M) mengatakan bahwa penjernihan udara terjadi jika adanya cahaya, tetapi dalam ruang gelap, udara tidak dapat dijernihkan. Jean Senebier (1742-1809 M) berpendapat bahwa peningkatan berat pohon willow

dari percobaan van Helmont disebabkan pengaruh udara.

#### **1.4 Kemajuan Penelitian Kesuburan Tanah Selama Abad XIX**

Theodore de Saussure tidak sependapat dengan hasil penelitian Senebier yang mengatakan pengaruh udara terhadap tetumbuhan dan asal mulsa garam-garam di dalam tanaman. Beliau berpendapat bahwa tanaman menyerap  $\text{CO}_2$  dan mengeluarkan  $\text{O}_2$  dalam ruang bercahaya (fotosintesa), dan menyerap  $\text{O}_2$  dan membebaskan  $\text{CO}_2$  (respirasi). Bila tanaman ditempatkan di dalam ruang tertutup tanpa  $\text{O}_2$ , tanaman akan mati.

De Saussure menyimpulkan bahwa tanah menyediakan unsur hara yang diperlukan tanaman, seperti N dan abu tanaman. Beliau menolak pendapat bahwa tanaman spontan menghasilkan Kalium. Selanjutnya berpendapat bahwa akar tanaman tidak berkelakuan seperti saringan. Permukaan akar adalah membran bersifat permeabel yang dapat menyeleksi zat-zat, yang memungkinkan masuknya air ke dalam akar lebih cepat dari garam-garam. Juga beliau mengemukakan bahwa perbedaan serapan garam-garam dan ketidak-tetapan komposisi tanaman, yang berbeda-beda menurut sifat tanah dan umur tanaman. Kesimpulannya bahwa Karbon (C) yang terkandung dalam tumbuhan berasal dari udara, tidak diterima oleh koleganya.

Sir Humphrey Davy (1813 M) menerbitkan buku *The Elements of Agriculture Chemistry*, berpendapat bahwa meskipun beberapa tanaman menerima Karbon (C) dari udara, tetapi porsi utama dari tanah. Beliau merekomendasikan penggunaan minyak sebagai pupuk, karena di dalam minyak terkandung banyak C.

Dari pertengahan abad XIX s.d abad XX dianggap periode waktu yang dirasakan kemajuan pesat nutrisi tanaman dan pemupukan. Jean Baptiste Boussingault (1802-1882 M) mendirikan kebun percobaan di Perancis. Beliau melakukan penelitian dengan plot-plot percobaan yang lazimnya kita lakukan sekarang. Beliau secara berhati-hati melakukan penimbangan, analisis bahan pupuk, dan memanen tanaman dengan cermat. Beliau juga mencatat keseimbangan unsur hara tanaman yang berasal dari air hujan, tanah dan udara, menganalisis komposisi tanamannya pada fase pertumbuhan, sehingga beliau disebut sebagai Bapak Percobaan Lapangan.

Teori-teori tua tentang humus masih juga dianut banyak orang. Teori tua humus menyebutkan bahwa penghancuran sisa-sisa tumbuhan dan binatang memberikan produk-produk yang digunakan akar tumbuhan tanpa memperhatikan faktor lainnya atau sumber lainnya yang turut menyusun tubuh tanaman. Pendapat ini dibantah Justus von Liebig (1803-1873 M).

Beliau menyatakan bahwa: (1) hampir seluruh C dalam tumbuhan berasal dari CO<sub>2</sub> udara; (2) hidrogen dan oksigen dari air; (3) Logam alkali menetralkan asam yang dibentuk tumbuhan sebagai hasil aktifitas metabolisme; (4) fosfat (P) diperlukan untuk pembentukan biji; (5) Tumbuhan menyerap semua yang diperlukan tanpa diskriminasi dari tanah, dan mengekskresikan bahan-bahan yang termasuk non esensial melalui akar.

Hasil penelitian Liebig tidak semuanya benar, misalnya asam asetat adalah hasil ekskresi akar, dan satu-satunya bentuk N yang diserap akar adalah NH<sub>4</sub>. Liebig juga mengatakan bahwa pertumbuhan tanaman adalah proporsional dengan jumlah zat hara yang tersedia di dalam pupuk. Beliau juga mengembangkan Hukum Minimum yang mengatakan bahwa pertumbuhan tanaman dibatasi oleh unsur hara yang terdapat dalam keadaan yang sangat rendah, sedangkan faktor lainnya berada dalam keadaan cukup. Beliau dikenal sebagai Bapak Kimia Pertanian.

J. B. Lawes dan J. H. Gilbert tahun 1843 M membangun Stasiun Percobaan di Rothamsted, Inggris. Mereka berpendapat bahwa tidak semua hasil penelitian Liebig itu benar. Mereka mengemukakan hasil penelitiannya sebagai berikut: (1) Tanaman memerlukan kalium (K) dan fosfor (P); (2) Tanaman leguminosae membutuhkan asupan nitrogen (N); (3) Kesuburan tanah dapat dijaga selama beberapa tahun

dengan pupuk kimia; (4) Pengaruh pengosongan lahan (bera) menguntungkan dari segi pandang peningkatan nitrogen tanah.

Tanaman kacang-kacangan tumbuh dan berkembang tanpa pemberian nitrogen ke dalam tanah, tetapi pada tanah lain, tanaman kacang-kacangan tidak tumbuh dan berkembang, karena mungkin tanah tidak mengandung bakteri rhizobium. Theodore Schloessing, ahli bakteri dari Francis tahun 1879 M dan Alfred Muntz menjernihkan air limbah dengan saringan pasir dan batu kapur, kemudian filtratnya ditampung dan dianalisis secara periodik dan selama 28 hari hanya  $\text{NH}_3\text{-N}$  yang dapat dideteksi. Pada akhir percobaan, senyawa  $\text{NO}_3$  muncul di dalam filtrat. Schoessing dan Muntz mencatat bahwa produk  $\text{NO}_3$  dapat berhenti dengan ditambah khloroform, dan pembentukan  $\text{NO}_3$  terulang kembali dengan ditambah air limbah segar. Mereka menyimpulkan bahwa bakteri yang bertanggung jawab melaksanakan proses ini.

Robert Warrington mengaplikasikan hasil penelitian ini. Nitrifikasi dapat berhenti dengan ditambah karbon disulfida dan khloroform dan proses ini terulang kembali bila ditambah tanah yang tidak steril. Beliau juga mendemonstrasikan bahwa reaksi-reaksi ini adalah amonia menjadi nitrit, dan nitrit menjadi nitrat.

Warrington tidak berhasil mengisolasi organisme yang bertanggung jawab terhadap proses nitrifikasi. S. Winogradsky yang dapat mengisolasi bakteri-bakteri itu dengan menggunakan *silica gel plate*, bukan medium agar, karena organisme tersebut bersifat autotrof yang memperoleh C dari atmosfer.

Helriegel dan Wilfrath tahun 1886 M menyimpulkan bahwa bakteri harus terdapat di nodula-nodula akar dan bakteri inilah yang mampu mengasimilasikan gas N<sub>2</sub> atmosfer dan mengubahnya ke bentuk yang dapat digunakan tumbuhan tingkat tinggi. Informasi ini membuka teori baru tentang fiksasi N oleh bakteri. Mereka tidak berhasil mengisolasi bakteri ini. Akhirnya isolasi bakteri dapat dilakukan oleh Beijerinck dan menyebutnya dengan *Bacillus radicumicola*.

## 1.5 Perkembangan Kesuburan Tanah di USA

Edmond Luffin (1825-1945 M) menggunakan pertama kali bahan kapur pada daerah basah di USA untuk menggantikan unsur kesuburan tanah yang hilang karena panen dan tercuci. Tanaman mengekskresikan asam-asam lemah sehingga penentuan status kesuburan tanah dengan menggunakan ekstraksi asam lemah telah banyak dilakukan peneliti. Hasil analisis contoh tanah berkorelasi dengan hasil tanaman.

E.W. Hilgard (1833-1916 M) merintis ekstraksi contoh tanah dengan asam untuk menentukan status

kesuburan tanah. Beliau menemukan bahwa kelarutan maksimum mineral tanah dalam HCl diperoleh bila BJ asam 1,115. Peneliti lain, Milton Whitney dan C. G. Hopkins juga meneliti status kesuburan tanah.

Abad XX di USA didirikan pusat-pusat penelitian pertanian dengan berbagai percobaan. Kesimpulan percobaan adalah keuntungan yang dicapai bila pemupukan tanaman dilakukan. Unsur hara yang sering kekurangan dan dibutuhkan tanaman adalah N, P, K, dan unsur lainnya.

Uji tanah dan rekomendasi pemupukan semakin lama semakin populer. Kemajuan petani sangat ditentukan hasil penelitian. Setiap persoalan yang baru dipecahkan dengan penelitian, adakalanya timbul persoalan lainnya untuk dipelajari.

Kemajuan penelitian menjelang akhir abad XIX dan setelah memasuki periode abad XX merupakan kegiatan-kegiatan yang bertanggung jawab terhadap pengetahuan dewasa ini. Meskipun singkat, sejarah kesuburan tanah yang telah diuraikan di atas sedikit banyak memberikan gagasan peneliti untuk menerobos dan memecahkan "rahasia" yang dimiliki kehidupan tumbuhan dan waktu yang menyatakan kapan itu terjadi (Russel 1978; Tisdale & Nelson 1975).



## II. Tanah sebagai Medium Penyedia Unsur Hara Tanaman

Tanah tersusun atas bahan mineral (45%), bahan organik (5%), lengas (25%), dan udara (25%). Bahan mineral dan bahan organik adalah bahan padat tanah (*solid material*), merupakan sumber unsur hara esensial bagi tanaman. Unsur hara esensial yang dibutuhkan tanaman berjumlah 16, yaitu C, H, O, N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, dan Cl.

Unsur C, H, dan O dikenal unsur hara non mineral; N, P, dan K disebut unsur hara mineral utama; S, Ca, dan Mg digolongkan unsur hara mineral sekunder; Fe, Mn, Cu, B, Mo, dan Cl disebut unsur hara mikro. Unsur hara non mineral dimaksudkan unsur hara yang bersumber dari bahan organik, udara, dan/atau air.

Tanaman menyerap unsur hara esensial melalui akar atau daun. Tanah mengandung unsur hara dalam jumlah yang besar, tetapi hanya sedikit unsur hara yang tersedia untuk tanaman. Misalnya, besi (Fe) total tanah > 5000 ppm, Fe tanah yang tersedia < 5 ppm (Hodges 2011).

Sifat tanah yang berkenaan langsung dengan tanah sebagai media penyedia unsur hara bagi tanaman atau dikenal dengan tandon/cadangan unsur hara (*nutrient reservoirs*) adalah sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Sifat fisik tanah terdiri atas struktur tanah, tekstur tanah, permeabilitas tanah, dan lengas tanah. Sifat kimia terdiri atas Kapasitas Pertukaran Kation (KPK), pH, kejenuhan basa, dan kejenuhan aluminium. Sifat biologi tanah meliputi bahan organik tanah, siklus N, P, dan S, dan jasad renik tanah (aktifitas dan jumlah populasi). Dua hal lagi yang menentukan tanah sebagai penyedia unsur hara adalah koloid tanah dan larutan tanah. Di bawah ini akan dibahas satu demi satu sifat tanah tersebut.

Struktur tanah mencerminkan susunan partikel tanah (mineral dan bahan organik) dengan pori-pori tanah. Macam struktur tanah yang dikenal granuler, remah, gumpal (bersudut dan bulat), lempeng, prismatic, dan kolumnar. Granular bila tanah beragregat tunggal dan/atau butiran tunggal. Remah bila tanah beragregat banyak yang berukuran kecil, sedang, dan besar. Gumpal bila tanah beragregat dan membentuk gumpalan yang bersudut atau bulat dan berukuran kecil, sedang, dan besar. Lempeng bila tanah membentuk pipihan seperti papan. Prismatic bila tanah menyerupai bentuk prisma. Kolumnar bila tanah menyerupai bentuk silinder atau bulatan yang memanjang. Penilaian struktur tanah terdiri atas tipe,

ukuran, dan kekuatan beban. Tipe, dan ukuran struktur tanah tadi telah dibicarakan, kekuatan beban suatu struktur tanah diberi nilai 0, 1, 2, 3, dan 4. Nilai kekuatan beban ini bila tanah mudah pecah tanpa ditekan dengan tangan diberi nilai 0, diberi sedikit tekanan diberi nilai 1, ditambah tekanannya lalu pecah diberi nilai 2, sampai dengan tekanan paling tinggi dan tanah mulai pecah diberi nilai 4. Struktur tanah berkorelasi dengan ketersediaan lengas tanah, lalu lintas air dan udara di dalam pori tanah, pergerakan akar tanaman, dan ketersediaan unsur hara tanah. Bila tanah yang padat, tanah bermutu kurang baik karena ketersediaan lengas dan unsur hara sangat kecil dan/atau tidak ada sama sekali, lalu lintas air dan udara di dalam tanah sangat terganggu, dan pergerakan akar tanaman terhambat. Tanah yang padat rentan terhadap erosi tanah, karena air permukaan tanah mengikis tanah permukaan sampai dengan tanah dibawa ke tempat yang lainnya (misalnya sungai, danau, dan lembah aluvial). Struktur tanah yang stabil sangat dimungkinkan bila tanah mengandung bahan organik tanah dan bahan kapur, dan/atau bahan sementasi (misalnya besi dan mangan). Contohnya, tanah oksisol yang banyak mengandung besi berwarna merah, tanahnya mempunyai struktur tanah yang stabil, tidak mudah tererosi bila terkena air hujan. Tanah molisol yang kaya bahan organik juga berstruktur tanah stabil karena

mengandung bahan organik tanah yang tinggi sehingga agregat tanah tidak mudah pecah bila terkena usikan dari luar.

Tekstur tanah adalah sifat fisik tanah, perbandingan antara partikel pasir, debu, dan klei dalam persen. Penentuan tekstur tanah di lapangan dengan menggunakan metode peras tangan, atau dibuat pasta tanah yang dapat digulung sampai dengan tebal beberapa milimeter dan panjang beberapa cm. Bila tanah bertekstur pasir, dengan cara meraba tanah dan menggosokkannya diantara ke dua belah jari tangan jempol dan telunjuk, terasa kasar dan tajam. Bila tekstur tanah debu, tanah tampak berbuih dan licin seperti sabun ketika tanah dibasahi dan digosokkannya di antara ke dua jari tangan, jempol dan telunjuk. Bila tekstur tanah klei, tanah dapat dibuat pasta tanah dan dapat digulung sampai dengan tebal hanya beberapa milimeter dan panjang beberapa cm. Tekstur tanah berpengaruh terhadap besarnya Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) dan ketersediaan unsur hara dalam tanah. Tekstur tanah yang dominan pasir, KPKnya lebih rendah daripada tanah yang dominan klei atau debu. Bila diurutkan mulai dari tertinggi sampai dengan terendah KPKnya, diperoleh tanah klei, debu, dan pasir.

Permeabilitas tanah adalah daya lolos air dalam tanah, yang dinyatakan dalam mL per jam. Sifat ini berkaitan erat dengan struktur tanah, tekstur tanah,

bahan organik tanah, dan pencucian unsur hara tanah. Struktur tanah yang mampat atau padat, permeabilitas tanahnya sangat lambat. Tanah klei mempunyai permeabilitas yang rendah, dan tanah pasir, permeabilitasnya sangat cepat. Bahan organik tanah yang tinggi, permeabilitas tanahnya juga tinggi. Permeabilitas tanah yang tinggi kemungkinan terjadinya pencucian unsur hara dari profil tanah ke tanah bagian bawah profil tanah, sehingga unsur hara tanah tidak mungkin dijangkau perakaran tanaman.

Lengas tanah (*soil moisture*) adalah air yang terkandung di matrik tanah. Lengas tanah berbeda dengan air tanah (*ground water*). Air tanah dijumpai di lapisan geologi tanah yang sangat dalam dari permukaan tanah, biasanya bermuara ke sungai di bawah tanah. Lengas tanah berada dalam pori tanah yang bercampur dengan gas, dan unsur hara atau garam tanah, semuanya dikenal dengan larutan tanah. Unsur hara dalam larutan tanah siap diserap tanaman, dikenal dengan unsur hara tersedia bagi tanaman. Persentase lengas tanah bergantung pada musim atau iklim. Ketika musim kemarau, lengas tanah lebih rendah daripada lengas tanah ketika musim hujan. Dinamika lengas tanah juga dipengaruhi struktur tanah dan tekstur tanah. Ketika struktur tanah remah, pergerakan lengas tanahnya sangat lancar, tetapi ketika struktur tanah gumpal atau lempeng, pergerakan lengas tanahnya dapat lancar atau terhambat

bergantung posisi lempengan tanah. Lempengan tersusun saling menutupi, maka lengas tanah terhambat pergerakannya, tetapi kalau lempengan tersusun sejajar dan membentuk pori terbuka, maka pergerakan lengas tanahnya lancar. Lengas tanah sangat penting keberadaannya ketika unsur hara tanah tersedia bagi tanaman, karena lengas tanah dapat melarutkan unsur hara dan dapat langsung diserap tanaman.

Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) tanah adalah kemampuan tanah mempertukarkan kation dari permukaan koloid tanah dengan kation dari pupuk atau bahan amendemen tanah dan kation yang berada di permukaan koloid tanah lepas masuk ke dalam larutan tanah dan siap untuk diambil akar tanaman. KPK dinyatakan dengan jumlah konsentrasi kation Al, H, NH<sub>4</sub>, K, Ca, Mg, dan Na di permukaan koloid tanah yang siap ditukar dengan kation dari sumber pupuk atau sumber lain. Pengetahuan mineral tanah (mineral klei) dan bahan organik tanah sangat membantu dalam memahami KPK tanah dan sekaligus berkaitan dengan ketersediaan unsur hara dalam tanah. Mineral montmorilonit mempunyai KPK lebih tinggi daripada mineral kaolinit, sehingga ketersediaan unsur hara pada tanah mineral montmorilonit lebih banyak daripada ketersediaan unsur hara pada tanah mineral kaolinit. Montmorilonit mempunyai KPK > 100 cmol(+)/kg dan kaolinit

mempunyai  $KPK < 5 \text{ cmo}(+)/\text{kg}$ . Tanah dengan bahan organik tanah lebih tinggi mempunyai KPK lebih tinggi pula daripada tanah dengan bahan organik tanah yang rendah. KPK tanah yang tinggi, tanah mampu menyediakan unsur hara di dalam tanah untuk tanaman.

Reaksi tanah disebut pH tanah sangat berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara dalam tanah. Tanah masam (pH rendah) mengandung unsur hara Al, H, Fe, Mn yang dominan, sedangkan unsur hara esensial N, P, K, S, Ca, Mg, Zn, Cu, Mo, dan B sangat sedikit. Tanah alkalin (pH  $> 7,5$ ) mengandung unsur hara Ca, Mg yang dominan, sedangkan unsur hara esensial N, P, K, S, Zn, Cu, Mo, dan B sangat sedikit. Tanah netral (pH 7) mengandung unsur hara yang ideal, semua unsur hara esensial tersedia dengan cukup (N, P, K, S, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, dan B). Ketersediaan unsur hara berhubungan dengan pH tanah dinyatakan dalam diagram unsur hara vs pH.

Kejenuhan Basa (*bases saturation*) adalah jumlah kation basa (Na, K, Ca, dan Mg)-dapat ditukar dibagi KPK dikalikan 100%. Kejenuhan basa tanah menyatakan persentase kation basa yang dapat dipertukarkan dibanding dengan KPK. Semakin rendah kejenuhan basa semakin kurang subur tanahnya. Kejenuhan basa  $< 35\%$  menyatakan bahwa tanah kurang subur seperti tanah ultisol, oksisol dan/atau histosol. Tanah ultisol, oksisol, dan histosol

adalah ordo tanah yang kesuburan tanahnya sangat rendah.

Kejenuhan Aluminium (*Al saturation*) adalah konsentrasi Al dibagi KPK dikalikan 100%. Kejenuhan Al sangat berkorelasi dengan pertumbuhan dan hasil tanaman padi. Kejenuhan Al lebih realistis daripada konsentrasi Al saja yang digunakan untuk menilai kesuburan tanahnya. Kejenuhan Al menyatakan konsentrasi Al tanah dalam keberadaan KPK tanah. Semakin tinggi kejenuhan Al semakin tinggi tingkat keasaman tanahnya (pH rendah) dan ketersediaan unsur hara semakin rendah, atau dikatakan tanah kurang/tidak subur.

Bahan organik tanah dikenal dengan humus tanah memegang peranan sangat penting dalam mempertukarkan kation dan sekaligus menyediakan unsur hara bagi tanaman. Gugus fungsi karboksil (COOH) dan fenol-OH merupakan dua gugus fungsi yang aktif mempertukarkan kation H dengan kation lain (NH<sub>4</sub>, Ca, Mg, K, Na, Cu, Zn). Bahan organik tanah mempunyai KPK ratusan cmol(+)/kg sehingga mampu menyediakan unsur hara bagi tanaman.

Siklus N, P, dan S dalam tanah mencerminkan daur-ulang unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan belerang (S) di dalam ekosistem tanah. Siklus N ialah proses berubahnya N<sub>2</sub> (gas) ke senyawa N atau dari senyawa N ke N<sub>2</sub> (Gambar 1a dan 1b) (Hodges 2011).



Proses yang terlibat dalam siklus N, antara lain immobilisasi, mineralisasi, aminisasi, amonifikasi, nitrifikasi, denitrifikasi, fiksasi, dan kehilangan N. Berikut ini akan dibahas satu per satu proses-proses tersebut.

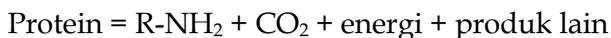
Immobilisasi ialah penyerapan N tersedia ( $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{NO}_3^-$ ) oleh tanaman dan jasad renik dan transformasi N ke bentuk senyawa N organik (asam amino dan protein).

Mineralisasi ialah perubahan senyawa N organik ke N tersedia ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , dan  $\text{NO}_3^-$ ) oleh jasad renik bakteri, jamur, dan jasad hidup tanah lainnya. Mineralisasi dan immobilisasi merupakan dua proses yang berkeselimbangan satu dengan yang lain di dalam tanah. Keseimbangan ini dapat terganggu bila terdapat sisa jaringan tanaman yang nisbah C/N tanaman sangat tinggi. Sisa jaringan tanaman dengan nisbah C/N yang tinggi sangat sulit terdekomposisi daripada sisa jaringan tanaman dengan nisbah C/N yang rendah. Sisa jaringan tanaman dengan nisbah C/N yang tinggi (100/1) seperti jerami, daun pinus, batang jagung, dan serbuk gergaji, selulosa, lignin, minyak, lemak, dan resin. Sisa jaringan tanaman dengan nisbah C/N yang rendah (15/1) seperti gula, tepung, protein, dan hemiselulosa. Sisa jaringan tanaman dengan nisbah C/N yang rendah dapat dengan mudah melepaskan dan menyediakan N tanah dari dekomposisi sisa jaringan tanamannya. Jasad renik

tanah menggunakan sisa jaringan tanaman sebagai sumber energinya dan menggunakan N-tersedia di dalam tanah untuk membentuk protein tubuhnya. Bila menambahkan sisa jaringan tanaman dengan nisbah C/N yang tinggi, maka kita perlu menambahkan pupuk N (baca: urea) ke dalam tanah agar tanah tidak kahat unsur N tanah, karena jasad renik tanah menggunakan urea sebagai sumber N untuk membentuk protein tubuhnya.

Aminisasi, amonifikasi, dan nitrifikasi adalah tiga proses yang terjadi di dalam mineralisasi bahan organik tanah. Aminisasi dan amonifikasi bekerja dengan adanya jasad renik tanah heterotrof (bakteri dan jamur), dan nitrifikasi bekerja dengan adanya bakteri autotrof. Jasad renik heterotrof menggunakan senyawa C organik sebagai sumber energinya, sedangkan bakteri autotrof mendapat energinya dari oksidasi garam organik dan mendapat C dari CO<sub>2</sub> atmosfer.

Aminisasi ialah proses dekomposisi bahan organik menghasilkan senyawa amine (R-NH<sub>2</sub>) dan asam amino. Reaksi di bawah ini sebagai contoh proses aminisasi yang sederhana.



Amonifikasi ialah proses dekomposisi senyawa amine dan asam amino menghasilkan senyawa

amonia. Reaksi di bawah ini sebagai contoh proses amonifikasi.



Amonia yang dihasilkan diubah menjadi nitrit dan nitrat dengan proses nitrifikasi. Amonia juga diserap oleh tanaman dan jasad renik tanah. Amonia diikat oleh klei tanah.

Nitrifikasi ialah proses ammonium berubah menjadi nitrat. Nitrifikasi terdiri atas dua tahap reaksi, pertama proses nitritasi (konversi amonium ke nitrit), dan nitratasi (konversi nitrit ke nitrat). Reaksi-reaksinya sebagai berikut.



Jasad renik tanah yang bekerja adalah Nitrosomonas yang tergolong bakteri obligat autotrof.



Jasad renik tanah yang bekerja adalah Nitrobacter yang tergolong bakteri obligat autotrof. Nitrifikasi berjalan lancar bila tersedia Oksigen ( $O_2$ ) sehingga memerlukan penghawaan (aerasi) tanah yang baik.

Denitrifikasi ialah proses reduksi nitrat tanah di bawah kondisi anaerob secara biologi. Bila tanah dalam keadaan anaerob (tergenang), nitrat diubah menjadi  $N_2$  atau  $N_2O$  (gas). Gas  $N_2$  dan  $N_2O$  hilang ke

atmosfir. Untuk menghindari kehilangan N melalui denitrifikasi dapat dilakukan dengan cara mengkondisikan tanah aerob, mengurangi tanah tergenang, dan mempertahankan pH antara 5,5 s.d 7.

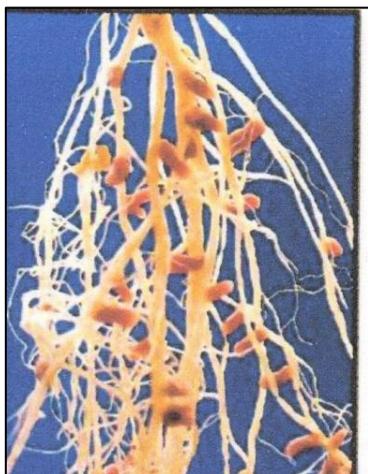
Fiksasi N ialah proses penyematan N dari atmosfir dengan cara alami atau industri. Nitrogen dari atmosfir diubah ke dalam bentuk N yang dapat diserap tanaman, yaitu  $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{NO}_3^-$ . Proses penyematan N dari atmosfir dapat dilakukan secara alami dengan penyematan N secara biologi menggunakan jasad renik dan dari kilatan petir. Penyematan N secara industri dengan bantuan gas alam ( $\text{H}_2$ ).

Penyematan N secara biologi dengan melibatkan jasad renik simbiotik dan non-simbiotik. Penyematan N simbiotik artinya penyematan N dari atmosfir melibatkan jasad renik tanah dengan inangnya tanaman legum, contohnya bakteri rhizobium spp dan tanaman kedelai (dapat juga kacang tanah atau alfalfa) sebagai inangnya. Ke duanya, bakteri rhizobium spp dan tanaman legum mendapat manfaat dari proses penyematan N dari atmosfir. Bakteri rhizobium spp memperoleh makanan atau energi (karbohidrat) dari tanaman legum dan tanaman legum memperoleh N dari atmosfir yang disemat oleh bakteri Rhizobium spp (Gambar 2). Jumlah N yang disemat antara 400 s.d 1000 kg/ha/tahun. Manfaatnya adalah menambah kredit N tanah sehingga pupuk N dari pabrik dapat dikurangi

dan mengurangi ongkos pembelian pupuk N, juga tidak menimbulkan pencemaran tanah, air, dan tanaman.

Proses penyematan N non-simbiotik artinya penyematan N dari atmosfer tidak melibatkan tanaman inang. Bakteri hidup bebas dan blue-green algae berperan dalam penyematan N dari atmosfer. Jumlah N yang disemat antara 40 – 90 kg/ha/tahun, tetapi umumnya 12 kg/ha/tahun.

Penyematan N dari kilatan petir. Nitrogen disemat oleh muatan listrik dari kilatan petir membentuk  $\text{NO}_3\text{-N}$ , dan  $\text{NO}_3\text{-N}$  dengan bantuan air hujan akan jatuh ke tanah dan menyumbang N tanah. Sumbangan N ke dalam tanah dari proses ini 10 s.d 20 g/ha/tahun.



Gambar 2. Penyematan N pada bintil akar kacang Pea dengan bakteri *rhizobium spp* (Sumber: Awatt Project 2009)

Penyematan N secara industri dapat terjadi dengan mereaksikan N<sub>2</sub> dari atmosfer dan H<sub>2</sub> (gas alam) dalam suatu industri atau pabrik pupuk. Reaksinya sebagai berikut:



Amonia (NH<sub>3</sub>) yang dihasilkan sebagai bahan dasar pembuatan pupuk amonium nitrat, amonium sulfat, sodium nitrat, urea, larutan nitrogen, dan amonium fosfat.

Kehilangan N (*N losses*) sangat mudah terjadi dengan cara volatilisasi, pencucian, limpasan permukaan (*run-off*), dan diambil tanaman (*plant uptake*). Volatilisasi artinya proses hilangnya nitrogen dalam bentuk pupuk amonia ke udara di bawah kondisi yang tertentu. Kondisi pH tanah alkalin atau penggunaan bahan kapur pada tanah masam, dapat memicu pupuk amonium (dapat berasal dari amonium sulfat, urea, amonium nitrat) berubah ke bentuk amonia (NH<sub>3</sub>) yang mudah hilang ke atmosfer.

Pencucian dan *run-off* N. Pencucian N dapat terjadi kalau NO<sub>2</sub> dan NO<sub>3</sub> yang larut di dalam air hujan dan terbawa ke tempat lain dengan cara *run-off* dan tercuci ke bagian bawah tanah (*subsoil*). Pencucian N menyebabkan kerugian ekonomi di pihak petani, dan menimbulkan pencemaran air, karena bahan pencemar NO<sub>2</sub> dan NO<sub>3</sub>.

Kehilangan N ketika panen tanaman sampai mencapai 2 - 4% dari bobot kering tanaman. Untuk mengembalikan N yang diambil tanaman ketika panen dengan memberikan pupuk hijau, pupuk kandang, dan pupuk kompos ke dalam tanah.

Siklus P dalam tanah mencerminkan ketersediaan P dalam tanah yang melibatkan proses penambahan, pengurangan, dan keseimbangan P dalam larutan tanah (Gambar 3). Penambahan P dalam larutan tanah berasal dari pupuk organik (pupuk kandang, limbah pertanian, pupuk kompos, dan pupuk hijau), sisa-sisa jaringan tanaman, unsur hara dari atmosfer (nitrat, dan fosfor larut air hujan), dan pupuk anorganik (industri pupuk). Kehilangan P terjadi karena P diambil tanaman berupa panen, P hilang melalui proses erosi dan *run-off*, dan melalui pencucian (*leaching*). Keseimbangan P dalam larutan tanah melibatkan bentuk-bentuk P dalam tanah. Bentuk-bentuk P adalah P-organik, P-larutan tanah, P-mineral primer (apatit), P permukaan mineral, dan P senyawa sekunder. P-organik berasal dari jasad renik tanah, sisa jaringan tanaman, dan humus tanah. P-larutan tanah ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$  dan  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) menjadi perhatian utama, karena P-larutan tanah dapat diserap langsung oleh tanaman sebagai prekursor transfer energi (ATP) dan pembentukan asam nukleat (DNA dan RNA). Nasib P-larutan tanah selain diserap tanaman juga dapat terjerap mineral klei dan oksida/hidroksida Al

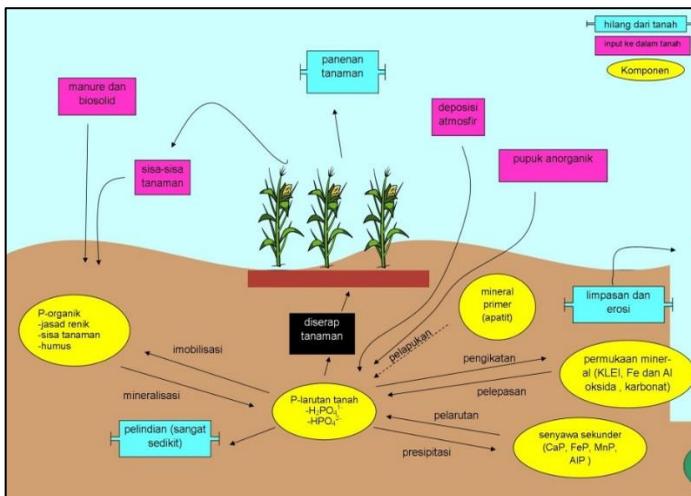
dan Fe, mengendap dalam bentuk senyawa sekunder (Fe-P, Al-P, Mn-P, dan Ca-P), tercuci ke lapisan bawah tanah, dan terikat senyawa organik (biomassa jasad renik tanah, biomassa tanaman, dan humus tanah).

Faktor-faktor yang mempengaruhi ketersediaan P tanah sebagai berikut:

1. Jumlah klei (*clay*). Semakin tinggi kadar klei semakin besar retensi P dalam tanah.
2. Tipe klei. Kaolinit dan oksida Fe dan Al mengikat  $P >$  montmorilonit, dan vemikulit.
3. pH tanah. Menentukan bentuk-bentuk P dalam larutan tanah (pada pH rendah dominan bentuk  $\text{HPO}_4^{2-}$  dan pada pH tinggi dominan bentuk  $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ ).
4. Kadar P tanah. Tanah mengandung P sangat tinggi cenderung melepaskan P ke dalam larutan tanah.
5. Lengas tanah. Kadar lengas tanah yang kecil membatasi pergerakan P dan perkembangan tanaman, dan lengas tanah yang tinggi mempengaruhi perakaran dan pengambilan P terbatas.
6. Waktu dan metode penggunaan P. Waktu kontak langsung P dengan tanah bertambah lama meningkatkan ketidak-tersediaan P tanah. Pada tanah dengan retensi P yang tinggi, metode penggunaan pupuk P dengan cara pita (*banding*) memberikan P tersedia lebih tinggi. Penggunaan pupuk P dengan cara sebar (*broadcasting*) lebih

cepat dan lebih murah dapat memberikan laju pemupukan P lebih besar tanpa kerusakan tanaman dan menghasilkan campuran lebih baik antara P dan tanah.

7. Kelarutan dan/atau ukuran partikel tanah. Retensi P cenderung meningkat dengan kelarutan tanah bertambah dan ukuran partikel bertambah besar menyebabkan retensi P menurun.
8. Pemupukan P dengan cara inkorporasi vs P sebar di permukaan tanah. Cara inkorporasi lebih efektif daripada cara sebar di permukaan tanah. Cara inkorporasi dapat digunakan bila tanah diolah dan dibajak, tetapi tidak dapat digunakan bila tanah tanpa diolah (tanpa olah tanah).



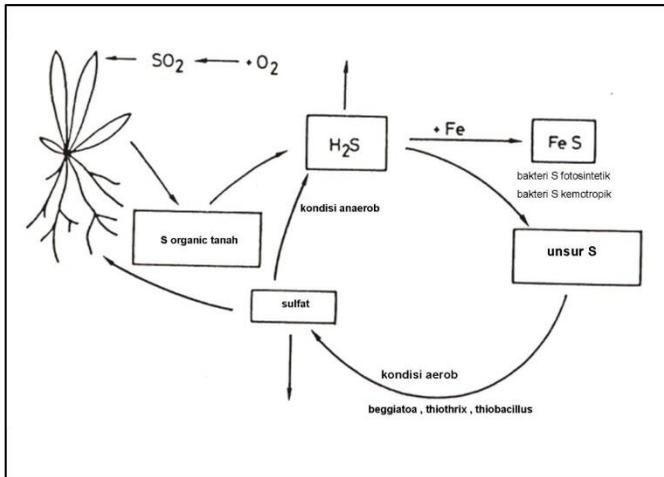
Gambar 3. Siklus P tanah (Sumber: Deenik 2005)

Siklus S (belerang) dalam tanah (Gambar 4) mencerminkan ketersediaan belerang dalam tanah dengan melibatkan proses penambahan, pengurangan, dan keseimbangan S dalam larutan tanah. Jumlah belerang di daerah pedesaan diduga 1 kg S/ha/tahun sampai dengan 100 kg S/ha/tahun yang ditemukan di kota industri. Kahat S dalam tanaman disebabkan tingginya penggunaan pupuk yang tidak atau hanya sedikit mengandung S, seperti diamoniumfosfat (DAP), urea amonium fosfat (UAP), amonium polifosfat (APP). Alasan lain, peningkatan hasil tanaman yang tinggi, karena penggunaan tanaman yang respons nitrogen, varietas hibrid, yang menyerap S dalam jumlah banyak sehingga memicu penurunan kadar S tanah, dan menurunnya penggunaan pupuk organik sebagai sumber S tanah (Prasad & Power 1997). Bentuk S yang langsung diserap tanaman adalah  $\text{SO}_4^{2-}$  dan sedikit dalam bentuk  $\text{SO}_2$  (gas). Belerang sangat penting dalam penyusun jaringan tanaman seperti penyusun utama protein (asam amino metionin, sistein, dan sistin), dan penyusun vitamin (biotin dan tiamin) dan khlorofil. Kebutuhan tanaman akan S hampir sama dengan P sebagai unsur hara esensial makro (Nyakpa dkk 1988).

Siklus S dalam tanah dapat dijelaskan sebagai berikut: Perubahan unsur S ke  $\text{SO}_4^{2-}$  atau  $\text{H}_2\text{S}$  bergantung pada kondisi tanah anaerob atau aerob (Gambar 4). Bila tanah anaerob, akan dihasilkan  $\text{H}_2\text{S}$

(gas), bila tanah aerob, akan dihasilkan  $\text{SO}_4^{2-}$ . Sulfat,  $\text{SO}_4^{2-}$  sangat mudah tercuci dan hilang dari profil tanah, tetapi sebagian diserap tanaman dan diubah menjadi S organik dalam jaringan tanaman. Bila tanaman mati, S organik akan didekomposisi menjadi S anorganik di dalam tanah. Bila tanah aerob, S anorganik akan berubah menjadi  $\text{SO}_4^{2-}$ , dan bila tanah anaerob,  $\text{SO}_4^{2-}$  berubah menjadi  $\text{H}_2\text{S}$  (gas). Hidrogen Sulfida,  $\text{H}_2\text{S}$  dapat hilang ke atmosfer atau berubah menjadi S anorganik dengan bantuan bakteri fotosintetik dan bakteri khemotropik. Bila ada besi (Fe) di dalam tanah,  $\text{H}_2\text{S}$  akan diubah menjadi  $\text{FeS}_2$ , yang dikenal dengan mineral Pirit (Mengel & Kirby 1987).

Jasad hidup tanah mencerminkan kehidupan jasad hidup tanah yang berperan penting dalam memelihara kesuburan tanah. Dua jasad hidup tanah, yaitu yang tampak mata dan yang tidak tampak mata. Yang tampak mata adalah cacing tanah, laba-laba, semut, kaki seribu, kumbang, rayap, serangga, dan vertebrata (tikus, kelinci, rusa, dan burung), sedangkan yang tidak tampak mata disebut jasad renik tanah (*microorganism*), bakteri, cendawan, aktinomisetes, ganggang, dan protozoa (*Organic exchange* 2009, Foth 1984). Jumlah jasad hidup tanah diperkirakan satu sampai dengan milyaran individu berada di dalam tanah.



Gambar 4. Siklus S dalam tanah (Sumber: Mengel & Kirby 1987)

Jasad hidup tanah berdasarkan atas sumber Karbon (C) dibagi ke dalam 2. Pertama, disebut Produser, adalah jasad hidup tanah (autotrof) yang menggunakan C-anorganik, sedangkan Konsumer dan Dekomposer (heterotrof) yang menggunakan C-organik sebagai sumber energinya. Tipe fototrof merupakan jasad hidup yang mendapatkan energi dari sinar matahari, dan tipe khemotrof adalah jasad hidup yang mendapatkan energi dari oksidasi unsur/senyawa anorganik. Tiga kelompok jasad hidup yang penting di dalam tanah adalah fotoautotrof, khemoautotrof, dan khemoheterotrof (Foth 1984). Tanaman tingkat tinggi dan algae termasuk fotoautotrof, bakteri oksidasi belerang dan bakteri

nitifikasi termasuk khemoautotrof, dan hewan, protozoa, cendawan, dan bakteri umumnya termasuk khemoheterotrof.

Marilah kita membicarakan sepintas jasad hidup tanah Produser, Konsumer, dan Dekomposer. Produser utama adalah tanaman yang menggunakan energi matahari untuk menyemat C dari CO<sub>2</sub> melalui fotosintesis. Biomassa tanaman yang dihasilkan merupakan makanan untuk jasad hidup Konsumer dan Dekomposer, termasuk juga manusia. Biomassa tanaman (rerumputan misalnya) dimakan oleh hewan kecil seperti tikus, dan kelinci. Serigala dan burung (Konsumer Ke dua) memakan tikus dan kelinci. Bobot biomassa hewan 1 gram berasal dari 10 gram biomassa tanaman yang dimakan. Sisanya kotoran hewan yang menjadi sumber unsur hara dan energi (dari C). Konsumer Pertama menjadi bahan makanan Konsumer Ke dua dan seterusnya. Konsumer mati dan ditambahkan ke dalam tanah.

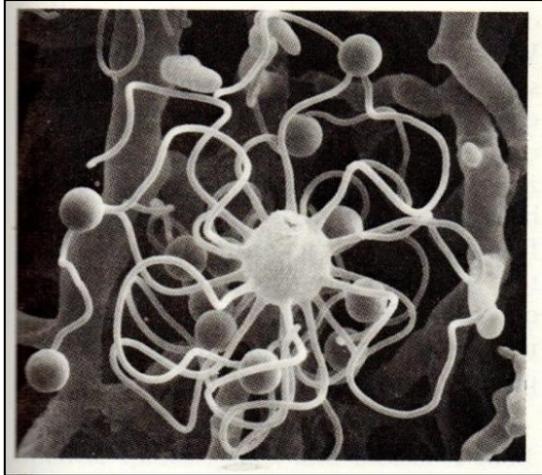
Kehidupan dalam tanah analog kehidupan di atas tanah. Akar, umbi, dan organ di bawah tanah merupakan bagian Produser Primer. Konsumer dan Dekomposer saling dikaitkan oleh rantai makanan. Jasad renik tanah memegang peranan dominan sebagai dekomposer di dalam tanah, hewan memegang peranan dominan sebagai konsumer di atas permukaan tanah.

Jasad hidup tanah, cacing tanah, dan kumbang tanah mampu memberikan struktur tanah yang baik. Cacing tanah dan kumbang menggali tanah untuk membuat terowongan atau pori tanah. Pori tanah terisi udara, air, dan tempat berkembangnya akar tanaman. Jasad renik tanah mampu dekomposisi bahan organik tanah sehingga membentuk agregat tanah yang stabil. Mereka memakan bahan organik tanah dan menyebarkan hasil dekomposisi ke seluruh bagian tubuh tanah. Tanpa jasad hidup tanah, bahan organik tetap berada di lapisan atas tanah. Pencampuran bahan organik dengan tanah sangat penting karena dapat memberikan kesuburan tanah yang baik dengan melepaskan unsur hara dari bahan organik tanah dan membentuk struktur tanah (van Scholl & Neuwenhuis 2007).

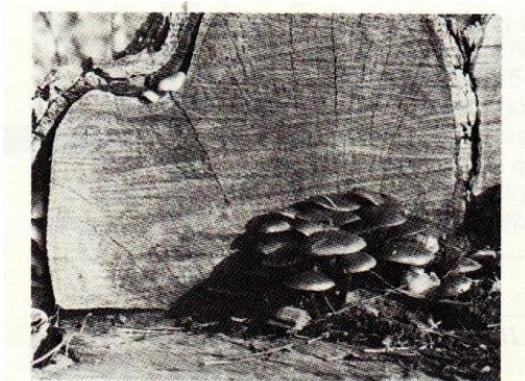
Jasad hidup tanah disebut juga jasad protista, alga biru-hijau dan bakteri. Bakteri bersel tunggal, jasad hidup terkecil, dan jasad hidup lainnya dalam jumlah dan jenis yang banyak. Tanah yang subur mengandung 1 milyar bakteri per gram tanah. Pada umumnya bakteri berbentuk batang bulat, berukuran beberapa mikron. Bobot bakteri adalah > 2000 kg/ha. Pada umumnya bakteri tergolong khemoheterotrof, karena memegang peranan penting dalam daur energi dan unsur hara. Bakteri tanah umumnya memerlukan oksigen dari udara tanah dan digolongkan bakteri aerob. Beberapa bakteri dapat beradaptasi hidup ada

atau tanpa oksigen disebut fakultatif aerob. Bakteri dapat hidup tanpa oksigen disebut bakteri anaerob. Jenis dan jumlah bakteri bergantung pada ketersediaan unsur hara dan kondisi lingkungannya.

Cendawan tanah termasuk jasad hidup tanah heterotrof, yang tumbuh dari spora, mempunyai hifa atau miselium. Miselium cendawan berperan untuk menyerap unsur hara, kelangsungan pertumbuhan, dan memproduksi hifa dan spora. Ukuran cendawan 5 mikron atau 5 s.d 10 kali ukuran bakteri. Keunggulan cendawan adalah mampu menginvasi dan menetrasi bahan organik. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa 1 gram tanah mengandung 10 s.d 100 meter hifa cendawan atau bobot cendawan lebih atau sama dengan bobot bakteri pada tanah umumnya (Gambar 5). Cendawan tanah sangat penting, karena toleran terhadap keasaman tanah hutan. Sisa kayu di lantai hutan memberikan makanan berlimpah untuk cendawan tertentu yang efektif mengurai lignin (Gambar 6).



Gambar 5. Cendawan tanah (Sumber: Foth 1984).  
Cendawan tanah mempunyai miselium dan spora (Foto:  
Michigam State University Pesticide Research Electron  
Microscope Laboratory)



Gambar 6. Cendawan kayu (Sumber: Foth 1984).

Cendawan kayu (*Agaricales*) yang tumbuh di tanah, kayu, dan kulit kayu. Tubuh cendawan dibentuk setelah hifa memperoleh makanan yang cukup dan air serta temperatur yang cocok.

Aktinomisetes diberi julukan sebagai bakteri seperti cendawan. Morfologi aktinomesetes di antara morfologi bakteri dan cendawan. Aktinomesetes berukuran dan berstruktur sel sama dengan bakteri, dan berhifa atau filamen sama dengan cendawan, dan menghasilkan spora yang menyerupai sel bakteri. Jumlah aktinomesetes di dalam tanah berkisar antara 1 juta s.d 36 juta/gram tanah.

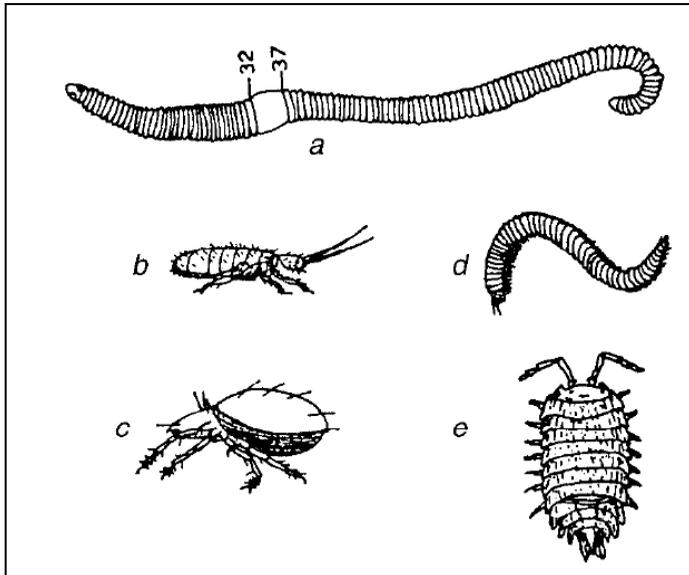
Alga banyak hidup di dalam air, sedangkan di dalam tanah sangat kecil. Alga tersebar di atas permukaan tanah yang mengandung banyak air tanah dan cahaya yang dibutuhkannya.

Protozoa adalah protista bersel tunggal. Protozoa tanah hidup di lapisan tipis air yang mengelilingi partikel tanah, seringkali disebut jasad hidup akuatik. Ketika tanah mengering, asupan makanan kurang, atau kondisi tanah buruk, protozoa berubah bentuk menjadi kista (*encyst*), dan aktif kembali ketika kondisi tanah yang cocok. Meskipun jumlahnya banyak di dalam tanah, tetapi fungsinya sangat kecil dalam dekomposisi bahan organik tanah.

Nematoda adalah cacing yang berukuran mikroskopik dan banyak dijumpai di dalam tanah. Nematoda parasitik paling penting di dalam

pertanian, karena banyak tanaman yang diserang seperti tomat, kacang, wortel, rerumputan, dan tanaman buah. Nematoda parasitik mempunyai alat penghisap disebut *stylet* yang terletak di ujung anterior berguna untuk menghisap cairan yang berada di dalam sel tanaman. Nematoda parasitik sangat bermasalah terutama pada perkebunan tanaman nanas.

Cacing Tanah paling banyak hidup di dalam tanah. Cacing tanah menyukai tanah yang lembab, banyak bahan organik dan asupan kalsium (Ca). Cacing tanah banyak dijumpai pada tanah bertekstur halus yang kaya bahan organik dan tidak terlalu asam. Jarang dijumpai cacing tanah pada tanah pasir yang rendah bahan organik dan asam. Populasi cacing tanah di lapis olah tanah dari beberapa ratus s.d satu juta lebih. Diperkirakan bobot cacing tanah adalah 200 s.d 1000 Kg/Ha. Jenis cacing tanah yang dijumpai di negara kita, *Lumbricus muconoides*, *Lumbricus rubellus*, *Lumbricus terrestris*, dan *Eisenia futida*. Cacing tanah tidak menyukai tanah yang tergenang. Mereka akan muncul ke permukaan tanah ketika hujan tiba, mereka akan mati kena sinar ultraviolet bila mereka tidak mendapatkan perlindungan secepatnya. Kotoran cacing tanah sangat berguna untuk memperbaiki kesuburan tanah (Gambar 7).

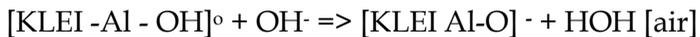


Gambar 7. Jasad hidup umumnya ditemukan dalam tanah (van Scholl & Neuwenhuis 2007). a= cacing tanah; b=spring-tail; c=rayap; d=kaki seribu; e= kumbang kayu

Koloid Tanah adalah fraksi tanah yang berukuran sangat halus, < 1 mikron, yang mempunyai sifat khas mampu menjerap unsur hara (ion) dan air. Dua sifat koloid tanah yang sangat penting berkaitan dengan penyediaan unsur hara adalah jenis/macam koloid dan luas permukaan koloid. Jenis/macam koloid tanah adalah koloid anorganik dan koloid organik.

Koloid anorganik dikenal dengan koloid mineral klei, sedangkan koloid organik disebut koloid bahan organik tanah atau humus tanah. Koloid mineral

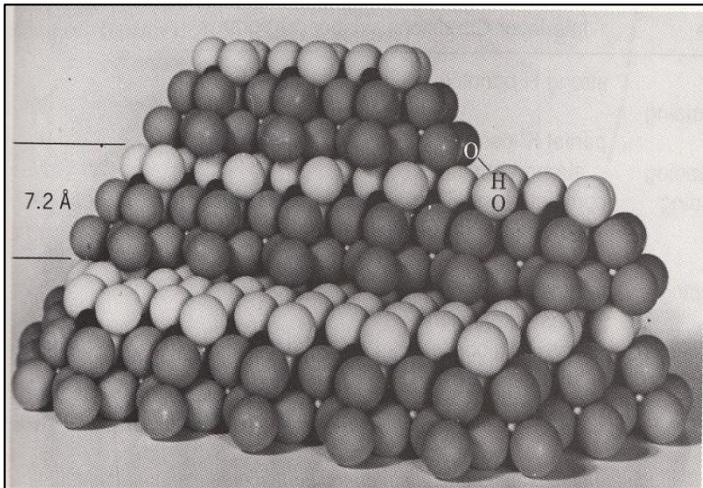
disusun oleh klei aluminosilikat dan Al- dan Fe-oksida/hidroksida. Ke dua mineral tanah ini menyumbangkan muatan positif dan negatif tanah. Bila muatan positif > muatan negatif tanah, maka menyebabkan pada umumnya kation-kation mudah tercuci, karena tidak terikat oleh koloid mineral. Sebaliknya, bila muatan positif < muatan negatif, maka menyebabkan kation-kation terikat oleh koloid mineral. Muatan (positif atau negatif) tanah yang tidak bergantung pH tanah disebut muatan tanah permanen, sedangkan bila bergantung pH disebut muatan tanah terubah. Misalnya, pH tanah yang rendah (bersifat tanah masam), tanah didominasi muatan positif, sedangkan pH tanah yang tinggi (bersifat tanah alkalin), tanah didominasi muatan negatif. Bila pH tanah mendekati 7, tanah bermuatan nol. Tanah bermuatan nol disebut ZPC (*Zero Point Charge*), artinya muatan kation = muatan anion atau disimbolkan  $H^+ = OH^-$ . Contohnya, muatan bergantung pH sebagaimana diterangkan dengan reaksi tanah di bawah ini.



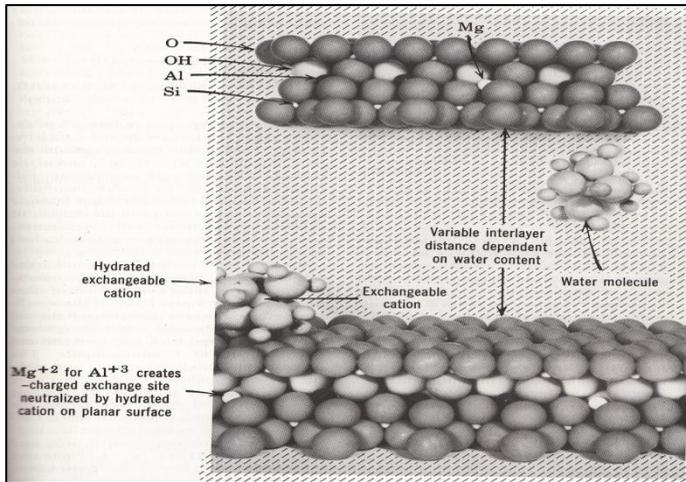
Koloid mineral klei hidroksida bereaksi dengan hidroksil (mungkin berasal dari bahan kapur atau bahan alkalin lain) menghasilkan muatan negatif koloid. Beberapa sifat koloid tanah yang penting

berupa tipe koloid, KPK, luas permukaan, kembang-kerut, pH, dan aktivitas koloid.

Tipe koloid tanah mencerminkan lapisan Si-tetrahedral dan lapisan Al-oktahedral. Tipe koloid tanah 1:1 artinya satu lapisan Si-tetrahedral dan satu lapisan Al-oktahedral dengan tebal lapisan  $7,2\text{\AA}$ . Tipe koloid tanah 2:1 artinya dua lapisan Si-tetrahedral dan satu lapisan Al-oktahedral dengan tebal lapisan  $12\text{\AA}$ . Contoh tipe koloid tanah 1:1 adalah kaolinit (Gambar 8), dan 2:1 adalah montmorilonit (Gambar 9), vermikulit, dan mika (Hodges 2011).



Gambar 8. Mineral klei kaolinit tipe 1:1 (Sumber:Foth 1984)



Gambar 9. Mineral klei montmorilonit tipe 2:1 (Sumber: Foth 1984)

KPK (Kapasitas Pertukaran Kation) ialah jumlah kation-kation tanah yang dapat dipertukarkan dengan kation lain yang berasal dari luar, misalnya dengan KCl 1 N, dan NH<sub>4</sub>OAc 1N. Kation-kation tanah yang dipertukarkan berupa Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. KPK koloid tanah bertipe 2:1 lebih besar daripada KPK koloid tanah bertipe 1:1, karena kemampuan mengikat kation koloid tanah tipe 2:1 lebih tinggi yang bersumber dari muatan permanen dan muatan bergantung pH, sedangkan koloid tipe 1:1 kemampuan mengikat kationnya berasal dari hancurnya struktur kristal klei disebabkan pelapukan fisik, kimia, dan biologi. Beberapa contoh KPK koloid

tanah, misalnya montmorilonit 80-120  $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ , vermikulit 120-150  $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ , mika 20-40  $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ , dan kaolinit 1-10  $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ . Bandingkan KPK koloid tanah mineral tersebut di atas dengan KPK tanah organik atau bahan organik tanah. KPK tanah organik 100-300  $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$  (Hodges 2011).

Luas permukaan koloid tanah mencerminkan luasan permukaan koloid tanah bila dibentangkan dalam suatu bidang datar dalam satuan berat yang sama. Tipe koloid 2:1 montmorilonit dan vermikulit mempunyai luasan permukaan koloid yang besar, tetapi masih lebih rendah dibandingkan dengan luas permukaan koloid organik. Tipe koloid montmorilonit dan vermikulit mempunyai kisaran 600-800  $\text{M}^2/\text{g}$  dan luas permukaan koloid organik 800-900  $\text{M}^2/\text{g}$ . Koloid tanah yang lain, misalnya kaolinit dan oksida/hidroksida mempunyai luas permukaan koloid 10-20 dan 10-70  $\text{M}^2/\text{g}$ . Inilah salah satu penyebab mengapa koloid tanah mempunyai KPK yang berbeda, karena luas permukaan koloid yang berbeda satu sama lain (Hodges 2011).

Kembang-kerut koloid tanah mencerminkan perilaku koloid tanah ketika terjadi pembasahan dan pengeringan tanah. Tipe koloid 2:1 dan koloid organik mempunyai kemampuan kembang-kerut, sedangkan tipe koloid 1:1 tidak ada. Implikasinya, tanah yang mempunyai tipe koloid 2:1 ketika musim penghujan, tanahnya akan mengembang, sedangkan pada musim

kemarau, tanahnya akan retak-retak atau pecah-pecah. Kalau kita berbudidaya tanaman padi misalnya, maka tanaman padi sangat tercekam, karena terhimpitnya akar/putus akar akibat tanah pecah/retak-retak, dan kekurangan air, dan bila keadaan ini akut tanaman padi akan mati. Jalan raya yang dibangun di atas tanah tipe 2:1 akan sangat berisiko dan berbahaya, karena jalannya akan rusak, retak, pecah dan bergelombang, atau tanahnya tidak stabil/berubah menurut musim hujan/kemarau (Hodges 2011).

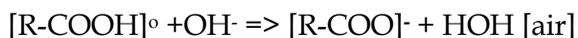
Reaksi tanah (pH) mencerminkan keasaman atau kebasaan suatu tanah. Tanah yang masam ditunjukkan oleh  $\text{pH} < 7$  dan kebasaan ditunjukkan oleh  $\text{pH} > 7$ . Tipe koloid 2:1 sangat kurang dipengaruhi oleh pH tanah, karena muatan kation atau anion tidak bergantung pada pH tanah, tetapi dia mempunyai muatan permanen (yang berasal dari substitusi isomorfik, yaitu perubahan struktur kristal tanah, karena adanya penggantian muatan kation bervalensi lebih tinggi mengganti kation bervalensi rendah, contohnya,  $\text{Si}^{4+}$  mengganti  $\text{Al}^{3+}$ ). Tipe koloid tanah 1:1 sangat bergantung pada pH tanah. Bila pH tanah sangat rendah (tanah sangat asam), maka tanah bermuatan positif, tetapi bila pH tanah sangat tinggi (tanah sangat alkalin), maka tanah bermuatan negatif, dan bila pH tanah 7, maka terjadi keseimbangan kation dengan anion ( $\text{H}^+ = \text{OH}^-$ ). Implikasinya, tanah asam seringkali kekurangan unsur hara esensial ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,

$\text{Ca}^{2+}$ , dan  $\text{Mg}^{2+}$ ), tetapi keracunan unsur mikro ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ). Oleh karena itu, perlu pemupukan. Bab membicarakan hal-hal pemupukan akan dibahas pada bab lain (Hodges 2011).

Aktifitas koloid tanah mencerminkan koloid tanah masih berfungsi secara aktif untuk menjerap kation, dan/atau anion. Mengapa suatu koloid tanah disebut aktif? Apakah ada koloid tanah yang tidak aktif? Koloid tanah aktif, karena koloid tanah itu mampu menjerap, dan mempertukarkan kation atau anion, sedangkan koloid tanah tidak aktif, karena tanah itu tidak mampu menjerap, dan mempertukarkan kation atau anion. Misalnya, koloid tanah yang aktif (tinggi s.d medium) adalah montmorilonit, vermikulit, dan bahan organik, sedangkan yang tidak aktif/rendah aktifitasnya adalah kaolinit. Implikasinya, koloid tanah yang aktif mampu menjerap pupuk lebih banyak daripada koloid tanah yang rendah aktifitasnya, sehingga pemupukan yang diberikan lebih hemat, efisien, dan efektif. Oleh karena itu, kita haruslah mempertimbangkan aktifitas koloid tanah dalam pemupukan (Hodges 2011).

Koloid organik atau bahan organik tanah mencerminkan humus tanah yang tersusun atas sisa jaringan tanaman yang telah lapuk dan sisa hewan mati dalam tanah. Struktur koloid organik sangat kompleks terdiri atas gugus fungsional  $\text{COOH}$  dan  $\text{fenol-OH}$ . Gugus-gugus fungsional ini berperan

untuk mengikat kation-kation dengan cara yang spesifik. Koloid organik tersusun atas lignin, poliuronid, dan senyawa lain yang mengandung karbon (C), nitrogen (N), oksigen (O), dan fosfor (P), belerang (S), dan unsur hara lainnya. Jumlah terbesar adalah C, N, dan O, sedangkan unsur hara yang lain dalam jumlah sedikit. Sifat gugus fungsional dan jumlah muatan sangat beragam bergantung pada sumber bahan organik tanah, tingkat dekomposisi, dan pH tanah. Muatan negatif koloid organik meningkat ketika kation  $H^+$  dinetralkan oleh  $OH^-$  sebagaimana reaksi di bawah ini.



Kemampuan koloid organik mengikat air sangat besar, 80-90% dari bobot totalnya, dibandingkan dengan koloid klei mampu mengikat air 15-20% dari bobot totalnya. Koloid organik mempunyai struktur yang terbuka sehingga dia mampu mengikat lengas dan kation dalam tanah. Bahan organik tanah bersifat retensi lengas yang tinggi, plastisitas dan kohesi yang rendah, dan berwarna hitam. Koloid organik tanah mampu memperbaiki sifat fisik tanah antara lain, retensi lengas yang tinggi, struktur tanah lebih stabil, mudah diolah, dan infiltrasi air lebih cepat. Mineralisasi humus tanah mampu menyediakan unsur

hara N, P, S, dan unsur hara mikro di dalam tanah (Hodges 2011).

Tandon (*reservoir*) unsur hara tanah sangat dipengaruhi sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Keseimbangan unsur hara yang tersedia dengan unsur hara tidak tersedia dijumpai *labile pool* (koloid tanah tempat pertukaran kation) yang sangat dipengaruhi pH tanah. Bila pH tanah rendah, tanah didominasi oleh muatan (*charge*) positif, sedangkan pH tanah tinggi, tanah didominasi muatan negatif, sedangkan pH netral, tanah dimuati kation dan anion yang seimbang. Sifat fisik tanah yang mempengaruhi ketersediaan unsur hara tanah antara lain, struktur tanah, permeabilitas tanah, tekstur tanah, dan kadar lengas tanah. Sifat kimia tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara tanah antara lain, pH, Kapasitas Pertukaran Kation (KPK), kejenuhan basa, kejenuhan aluminium, dan Daya Hantar Listrik (DHL) tanah. Sifat biologi tanah yang mempengaruhi ketersediaan unsur hara tanah antara lain, nisbah C/N tanah, aktifitas biologi, dan populasi jasad hidup tanah.

Ordo tanah ultisol, oksisol, dan/atau histosol didominasi muatan positif (karena pH rendah), sedangkan ordo tanah vertisol, andisol, inceptisol didominasi muatan negatif (karena pH tinggi). Tanah ultisol, oksisol, dan/atau histosol tidak mampu mengikat unsur hara (sebut kation) sehingga tanah-tanah tersebut kurang subur. Tanah vertisol, andisol,

dan/atau inceptisol mampu mengikat unsur hara sehingga tanah-tanah tersebut sangat subur. Kesuburan tanah juga dapat dipengaruhi oleh bahan induk tanahnya. Tanah ultisol, oksisol, dan/atau histosol berbahan induk tuf abu vulkan untuk 2 ordo pertama dan sisa-sisa tanaman zaman purba (*Angiosperm* dan *Gymnosperm*) untuk ordo terakhir.



## III. Mekanisme Ketersediaan Unsur Hara dalam Tanah

### 3.1 Definisi

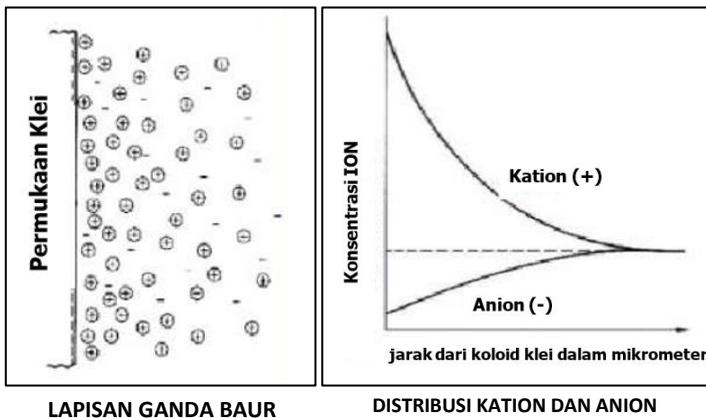
Tanah menyediakan unsur hara/ion bagi tanaman melalui 3 cara, yaitu intersepsi, difusi, dan aliran massa. Intersepsi adalah proses penyerapan kation, akar tanaman mengambil kation, akar bersinggungan langsung dengan kation. Difusi adalah proses gerakan kation di dalam larutan tanah dari bagian konsentrasi tinggi ke bagian konsentrasi yang rendah (Munawar 2011). Aliran massa adalah gerakan kation di dalam tanah ke permukaan akar yang terangkut oleh aliran konvektif akibat penyerapan air oleh tanaman (Munawar 2011). Mekanisme ketersediaan unsur hara melalui pertukaran ion, pergerakan ion, dan penyerapan ion. Pertukaran ion terdiri atas adsorpsi, pertukaran, dan fiksasi ion. Adsorpsi dikenal dengan jerapan adalah pengikatan ion oleh koloid tanah. Pertukaran ion adalah proses bertukarnya ion dari kompleks koloid tanah dengan ion yang berasal dari luar (misalnya dari pupuk) sehingga

ion masuk ke dalam larutan tanah dan siap diserap tanaman. Fiksasi ion adalah penambatan ion terjadi ketika jasad renik tanah, *Rhizobium* spp menambat nitrogen dari udara. Penyematan N dari atmosfer sangat penting dikaji, karena jumlah N dari atmosfer sangat besar (78%), tetapi tidak tersedia untuk diambil tanaman. Penyematan N simbiotik dapat dilakukan oleh bakteri *Rhizobium* sp dengan inangnya tanaman kacang-kacangan (kedelai, atau kacang tanah). Pergerakan ion adalah proses tersedianya unsur hara melalui intersepsi, difusi, dan aliran massa. Penyerapan ion adalah masuknya ion ke dalam sel epidermis akar, xilem, dan di bawa ke daun. Setiap ion mempunyai pembawa ion (*ion carrier*). Pembawa ion bersifat sangat spesifik, hanya berfungsi membawa ion tertentu dan tidak dapat digantikan oleh pembawa ion yang lain. Misalnya, pembawa ion K hanya dapat membawa ion K dari permukaan epidermis akar ke dalam xilem, dan dibawa ke daun.

### **3.2 Koloid Tanah**

Koloid tanah bersifat koloidal (berukuran sangat halus, kurang dari 1 mikron) yang mampu mengikat kation dan anion. Contohnya, pada permukaan koloid tanah (mineral dan organik) dijumpai muatan listrik (negatif dominan) dan mampu mengikat kation yang bermuatan listrik positif. Koloid tanah mampu mengikat kation-kation di permukaan

koloid sampai membentuk lapisan tipis (hanya beberapa mikron tebalnya), bersama-sama dengan lapisan tipis lainnya (larutan tanah juga kurang dari satu mikron tebalnya) membentuk lapisan ganda baur (*diffuse double layer*) (Gambar 10). Disinilah terjadinya pertukaran ion (kation dan anion) antara kation yang berada di permukaan koloid tanah dengan kation yang larut di dalam tanah atau kation berasal dari pupuk yang larut dalam air. Contohnya, seluruh permukaan koloid tanah dipenuhi oleh kation  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ . Kation-kation ini dapat ditukar dengan kation  $\text{NH}_4^+$  yang berasal dari  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1 N pH 7, sehingga kedudukan  $\text{NH}_4^+$  mengganti kedudukan kation selain  $\text{NH}_4^+$  di permukaan koloid tanah. Kation-kation yang terusir  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  dari koloid tanah masuk ke dalam larutan tanah dan siap untuk diambil oleh akar tanaman. Peristiwa ini disebut dengan pertukaran kation. Kemampuan tanah mempertukarkan kation yang berada di permukaan koloid tanah disebut Kapasitas Pertukaran Kation (KPK). KPK tanah dinyatakan dengan satuan  $\text{cmol (+)/kg}$  atau  $\text{me/100 g}$  tanah. Proses adsorpsi dan pertukaran ion sangat penting dalam menyediakan unsur hara dalam tanah untuk diambil tanaman sebagai nutrisi tanaman.

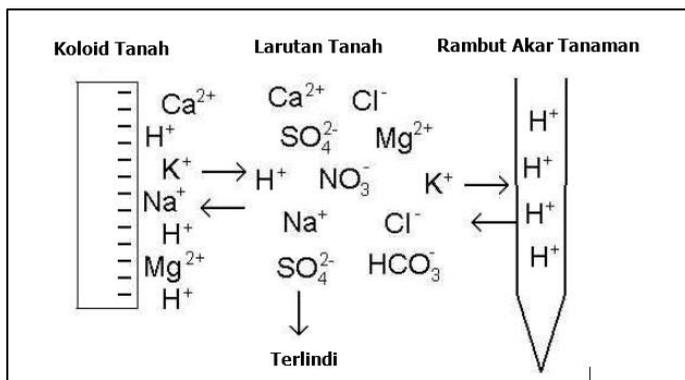


Gambar 10. Lapisan Ganda Baur (Brady, N. C. 1990) dan Distribusi Kation dan Anion di Permukaan Klei (Foth, H. D. 1984)

### 3.3 Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) Tanah

KPK tanah berkorelasi dengan muatan tanah (*soil charge*). Muatan tanah adalah muatan positif/negatif pada koloid tanah. Tanah yang bermuatan negatif mampu mengikat kation, sedangkan tanah yang bermuatan positif mampu mengikat anion. Jumlah kation yang terikat pada koloid tanah (muatan negatif dominan) disebut KPK tanah, dan jumlah anion yang terikat pada koloid tanah (muatan positif dominan) disebut kapasitas pertukaran anion atau KPA tanah. Tanah berpelapukan telah lanjut seperti ultisol dan oksisol didominasi oleh muatan positif sehingga  $KPA > KPK$ . Tanah molisol, inceptisol,

andisol didominasi oleh muatan negatif sehingga  $KPA < KPK$ . Tanah ultisol, dan oksisol mempunyai kemampuan menukarkan kation yang rendah sehingga pencucian kation (pupuk) relatif lebih besar daripada tanah molisol, inceptisol, dan andisol (Gambar 11).



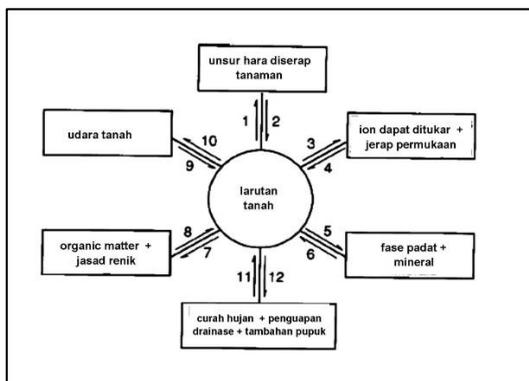
Gambar 11. Kapasitas Pertukaran Kation Tanah (Vogt and Seip, 2017)

Daya sanggah tanah sangat penting untuk memelihara asupan ion/unsur hara di dalam larutan tanah. Dua cara pergerakan ion yang umum. Pertama, aliran massa ialah gerakan ion yang cepat dengan air di dalam pori tanah. Tanah dengan kapasitas pegang lengas tanah rendah, aliran massa dapat menyebabkan pencucian unsur hara dari mintakat (*zone*) akar. Aliran massa bergantung pada konsentrasi unsur, tipe interaksi unsur dan koloid tanah, kapasitas pegang lengas, dan kejenuhan air. Ke dua, proses difusi ialah

prosesnya lebih lambat daripada aliran massa, tetapi sangat penting dalam mengisi larutan tanah dengan unsur hara, terutama unsur hara yang sangat kuat terikat oleh koloid tanah. Suatu gambaran difusi, dengan pergerakan pupuk dari larikan di dalam tanah yang kapasitas lengas lapangannya yang kurang. Semua partikel tanah diselimuti oleh lapis tipis lengas tanah yang dilalui unsur hara. Peristiwa ini digambarkan seperti tetesan tinta yang ditempatkan di dalam secangkir gelas air, tinta akan menyebar dari tetesan yang pekat ke larutan berwarna seragam, ion di dalam larutan tanah akan berbaur dari titik konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah (Hodges 2011).

Larutan tanah (*soil solution*) ialah lengas yang terikat oleh partikel tanah, tempat larutnya unsur hara bagi tanaman. Larutan tanah sangat penting karena unsur hara yang larut dalam tanah berbentuk ion (kation dan/anion) yang mudah diserap akar tanaman. Akar tanaman bersinggungan langsung dengan volume tanah diduga < 3% unsur hara total yang terserap tanaman. Larutan tanah secara tetap terisi unsur hara yang diasup dari cadangan unsur hara di koloid tanah melalui mekanisme keseimbangan dan transportasinya. Larutan tanah memegang unsur hara umumnya dalam bentuk kation yang jumlahnya proporsional dengan jumlah unsur hara yang ada di permukaan koloid tanah. Tanaman menyerap unsur hara (kation dan/anion) dari larutan tanah. Hal ini

menyebabkan ion yang berada di dalam larutan tanah berkurang atau keseimbangan unsur hara terganggu. Misalnya, tanaman menyerap unsur K dari larutan tanah, sehingga terjadi ketidak-seimbangan K di dalam larutan tanah. Kalium yang dari permukaan koloid tanah atau mineral tanah dilarutkan untuk mengisi K yang diserap tanaman. Proses keseimbangan unsur hara seperti ini disebut daya sanggah koloid tanah. Daya sanggah konsentrasi unsur hara larutan tanah bergantung pada khuluk (*nature*) tanah. Tanah yang mengandung klei yang tinggi mempunyai daya sanggah unsur hara lebih tinggi daripada tanah yang rendah kandungan kleinya. Faktor-faktor berpengaruh terhadap konsentrasi unsur hara di dalam larutan tanah, yaitu udara tanah, jasad hidup tanah, bahan organik tanah, evapotranspirasi, pelarutan dan pengendapan mineral, dan penambahan pupuk anorganik dan pupuk organik (Gambar 12).



Gambar 12. Larutan tanah (Hodges 2011)

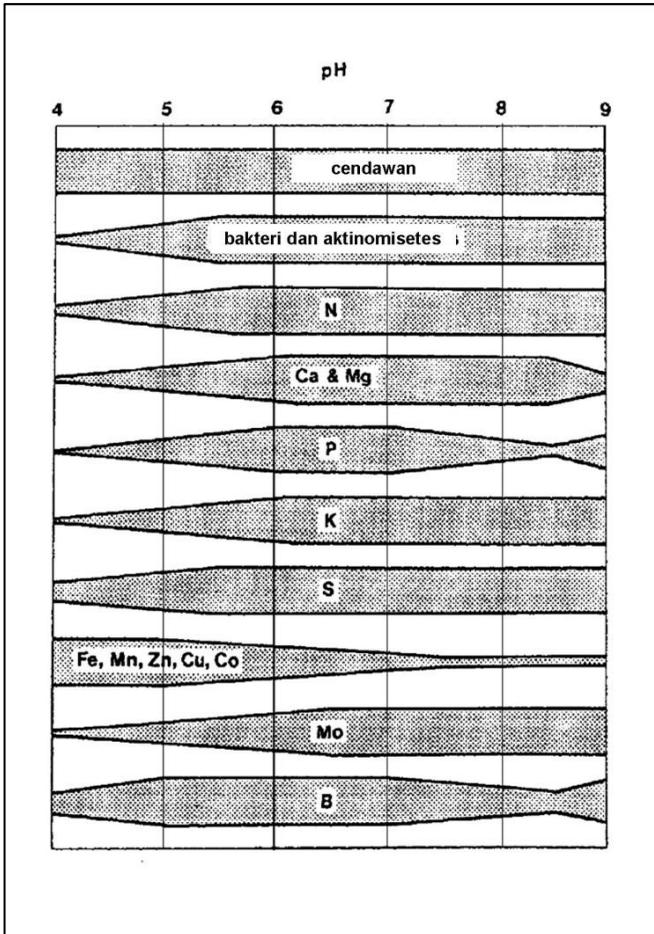
### **3.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Unsur Hara**

Ketersediaan unsur hara di dalam tanah sangat bergantung pada pH tanah, kadar bahan organik tanah, kadar dan tipe klei tanah, keadaan oksidasi-reduksi, kadar garam, dan mineral tanah. Marilah kita bahas satu demi satu.

#### **Reaksi Tanah (pH)**

Reaksi tanah (pH) ialah konsentrasi atau aktifitas kation  $H^+$  di dalam larutan tanah, biasanya dikenal dengan minus log  $[H^+]$ . Contoh, bila konsentrasi  $H^+$  di dalam larutan tanah  $10^{-7}$  M maka besarnya nilai  $pH = -\log [10^{-7}] = 7$ . Besarnya nilai pH tanah berbanding terbalik dengan besarnya konsentrasi kation  $H^+$ . Semakin tinggi konsentrasi  $H^+$  semakin kecil nilai pH tanah. Biasanya tanah masam (tanah mineral dan tanah organik) mempunyai nilai pH yang rendah, karena tanah masam mengandung kadar  $H^+$  yang tinggi. Kation  $Al^{3+}$  bila terhidrolisis dengan air menghasilkan kation  $H^+$  sehingga  $H^+$  dan  $Al^{3+}$  dikenal sebagai penyebab kemasaman tanah mineral. Hubungan antara pH tanah dan ketersediaan unsur hara di dalam tanah dinyatakan dengan Gambar 14 (FAO 1984; van Scholl & Nieuwenhuis 2004). Reaksi tanah ( $pH < 7$ ) memberikan ketersediaan unsur hara semakin berkurang, tetapi unsur  $Al^{3+}$  dan unsur hara mikro yang lebih tinggi konsentrasinya, dan pH tanah

>7 memberikan ketersediaan unsur hara kurang, tetapi unsur hara Ca dan Mg yang tinggi konsentrasinya. Reaksi tanah (pH) berkisar antara 6,5 s.d 7,5 memberikan ketersediaan unsur hara yang optimal. Aktifitas jasad renik tanah (*soil microorganism*) juga dipengaruhi oleh besarnya nilai pH tanah. Aktifitas jasad renik *Basidiomisetes spp* dan *Aktinomesetes spp* yang rendah pada pH < 6, sedangkan aktifitas fungi tidak terpengaruh oleh rendahnya pH tanah.



Gambar 13. Hubungan antara pH tanah dan Ketersediaan Unsur Hara dan Aktifitas Jasad Renik Tanah (FAO 1984; van Scholl & Nieuwenhuis 2004)

### **Bahan Organik Tanah (Humus Tanah)**

Bahan organik tanah sangat penting dalam pengelolaan kesuburan tanah, karena dapat membantu meningkatkan kesuburan tanah dan memperbaiki struktur tanah. Bahan organik tanah juga mampu mengikat air dan unsur hara sehingga unsur hara tidak tercuci atau terlindi, dan bahan organik tanah mampu merangsang pertumbuhan jasad hidup tanah, juga mampu merombak bahan organik sehingga menyediakan unsur hara bagi tanaman (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Bahan organik tanah mengandung bahan organik segar dan humus. Bahan organik segar terdiri atas sisa tanaman dan limbah hewan yang belum terdekomposisi (akar, sisa tanaman, dan kotoran hewan). Bahan organik segar ini diubah ke dalam bentuk humus tanah oleh jasad hidup tanah. Dalam proses ini dilepaskan unsur hara untuk tanaman. Humus tanah adalah bahan organik tanah yang berwarna hitam (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Bahan organik tanah atau humus tanah adalah sifat tanah yang sangat penting dalam memelihara ketersediaan unsur hara tanah dan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Bila suatu tanah tidak mengandung bahan organik tanah, maka tanah tersebut akan mengalami kemunduran kesuburan tanah, produktifitas tanah, mutu tanah, dan kesehatan tanah. Bahan organik tanah berfungsi untuk memelihara kegiatan jasad renik tanah, struktur tanah, dan

mengurangi kemasaman tanah (FAO 2001). Gaskell dkk (2012) mengatakan bahwa bahan organik tanah sebagai sumber unsur hara (N, P, S, Fe, Cu, Zn), memperbaiki struktur tanah, infiltrasi air, meningkatkan kapasitas pertukaran kation (KPK) dan air, meningkatkan kehidupan jasad renik tanah dan tanaman. Selanjutnya beliau juga mengatakan bahwa sumbangan bahan organik tanah terhadap KPK 20 s.d 70% dari KPK total tanah, dan bahan organik tanah setiap tahunnya mengalami dekomposisi 2 s.d 5%. Sumber bahan organik adalah tanaman penutup (*cover crop*), pupuk kompos, pupuk organik, pupuk kandang hewan (*manure*), dan pupuk cair organik (Gaskell dkk 2012).

Komposisi unsur hara yang ada di dalam pupuk organik disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi unsur hara dalam pupuk organik

Bahan Organik	N <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	C/N
Pupuk Kandang					
Sapi (segar)	0,3	0,3	0,1	-	-
Sapi (kering)	2,0	1,5	2,	4,0	20
Bebek (segar)	1,2	1,5	0,6	-	-
Kambing (segar)	0,6	0,6	0,3	0,3	-
Kambing (kering)	2,0	1,5	3,0	2,0/5,0	-
Kuda (segar)	0,7	0,4	0,5	0,2	-
Kuda	2,0	1,5	1,5	1,5	-
Poultry:					
-lapis (segar)	1,6	1,5	0,9	-	-
-lapis (kering)	5,0	3,0	1,5	4,0	-
-Broiler (kering)	4,0	2,0	1,2	1,0	-
Angsa (segar)	0,6	0,5	0,5	-	-
Animal by-product					
Tulang (kasar)	4,0	22,5	0,2	33,0	8,0
Darah (kering)	12,0	2,5	1,0	0,5	3,0
Sisa tanaman					
Kulit kayu	1,6	0,9	0,5	4,7	-
Kulit kakao	1,0	1,5	3,0		
Kakao	4,0	2,0	2,5	0,5	-
Biji kapas	7,0	3,0	2,0	0,5	-
Daun kering	0,5	0,2	0,5	1,0	45
Kacang tanah	7,0	15	1,5	0,5	-
Batang jagung	0,8	0,2	1,4	0,2	-
Batang sorgum	0,7	0,1	1,4	0,4	70
Buah anggur	5,5	2,5	1,5	1,0	-
Kulit kacang tanah	1,3	0,1	0,6	1,4	-
Batang kacang tanah	0,7	0,1	0,6	0,5	-
Jerami padi	0,7	0,1	1,0	0,3	100
Kedelai	7,0	1,5	2,5	0,5	-
Batang kedelai	1,4	01	10	0,9	-
Gulma	0,5	0,2	0,7	0,5	-
Clover	2,4	0,2	0,9	2,0	-
Crotalaria juncea	2,0	0,2	1,0	0,8	-
Sesbania sesban	2,1	0,2	1,1	0,8	-

Sumber: Inckel et al. 2005

## **Kadar dan Tipe Klei Tanah**

Klei (*clay*) ialah partikel tanah berukuran halus ( $< 2$  mikron). Klei berukuran sangat halus sehingga mempunyai kemampuan mengikat air dan unsur hara dengan ikatan kimia, van der Waals, dan ikatan spesifik (Bohn et al. 1979).

Kadar klei sangat besar pengaruhnya terhadap ketersediaan unsur hara dalam tanah. Semakin tinggi kadar klei tanah, semakin tinggi jumlah unsur hara yang dapat diikat atau ditukar dengan kation lain (dari pupuk). Juga tipe klei sangat berpengaruh besar terhadap ketersediaan unsur hara. Tipe klei tanah yang dikenal tipe 1:1 (diwakili oleh mineral kaolinit), 2:1 (montmorilonit), mineral oksida besi dan aluminium, dan alofan (amorf, tidak berkrystal).

Tipe mineral klei 2:1, mineral oksida besi dan aluminium, dan alofan mempunyai kemampuan mengikat unsur hara yang sangat kuat, sedangkan mineral klei 1:1 sangat rendah kemampuannya mengikat unsur hara. Implikasinya pemupukan tanah tipe klei 1:1 berbeda dengan pemupukan tanah tipe klei 2:1, oksida besi dan aluminium, dan alofan. Pemupukan tanah tipe klei 1:1 sedikit demi sedikit dan seringkali dipupuk karena menghindari pencucian pupuk (unsur hara) ke tempat lain (bagian bawah tanah, sungai, danau, dan laut).

## Reduksi dan Oksidasi Tanah

Reduksi dan oksidasi adalah peristiwa keadaan tanah dalam suasana tanpa/kurang  $O_2$  dan cukup  $O_2$ . Dapat juga dikatakan bahwa reduksi adalah kemampuan tanah menerima elektron dari suatu reaksi kimia di dalam tanah, dan oksidasi adalah kemampuan tanah memberikan elektronnya ke dalam larutan tanah. Misalnya, reaksi reduksi  $Fe^{3+}$  menjadi  $Fe^{2+}$ , karena besi menerima satu elektron (muatan negatif) dari larutan tanah, yang dapat menetralkan satu muatan positif dari  $Fe^{3+}$  dan tersisa 2 muatan positif sebagai muatan  $Fe^{2+}$ . Kebalikannya, reaksi oksidasi  $Fe^{2+}$  menjadi  $Fe^{3+}$  dengan adanya  $O_2$ .

Suasana reduktif tanah menyebabkan tersedianya unsur hara toksik ( $NH_3$ ,  $NO_3^{1-}$ ,  $N_2$ ,  $N_2O$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ , Fe, Mn, Cu, B) yang larut di dalam larutan tanah. Ammonia ( $NH_3$ ) dan nitrit ( $NO_2$ ) lebih toksik daripada nitrat ( $NO_3$ ) dan  $H_2S$  lebih toksik daripada sulfat ( $SO_4$ ),  $Fe^{2+}$  dan  $Mn^{2+}$  juga menyebabkan toksik terhadap padi sawah (Bohn et al. 1979).

Suasana reduktif tanah yang banyak dijumpai ketika tanah tergenang, tanah rawa, tanah sawah, dan tanah gambut. Suasana reduktif tanah dicirikan dengan warna tanah yang hijau, biru, atau keabu-abuan. Suasana oksidatif tanah dicirikan dengan warna tanah yang coklat, kuning, dan merah. Suasana oksidatif dapat menyebabkan lebih cepat terdekomposisi bahan organik tanah dengan bantuan jasad renik tanah yang menghasilkan unsur hara tanah

( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ , K,  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Suasana reduksi-oksidasi terjadi ketika secara bersama-sama atau bergantian suasana basah dan kering karena pengaruh musim hujan atau musim kemarau, dan dicirikan dengan warna tanah merah bercampur abu-abu atau merah kehijauan/kebiruan.

### **Kadar Garam Tanah**

Garam atau salinitas tanah adalah senyawa atau ion yang berada di dalam larutan tanah (garam Na, K, Ca, dan Mg). Penciri tanah garam adalah kadar garam Na, daya hantar listrik disingkat DHL (*electrical conductivity*), dan pH tanah. ESP (*Exchangeable Sodium Percentage*) adalah persentase garam Na yang dapat ditukarkan. ESP dirumuskan sebagai kadar Na terhadap Kapasitas Pertukaran Kation (KPK)  $\times 100 \%$ . SAR (*Sodium Adsorption Ratio*) adalah nisbah antara kadar Na terhadap jumlah Ca dan Mg, dinyatakan dalam  $\text{SAR} = [\text{Na}] / ([\text{Ca} + \text{Mg}] / 2)^{1/2}$  (Awatt Project 2009).

Daya hantar listrik (DHL) adalah kemampuan tanah mengalirkan arus listrik, karena dipengaruhi kadar garam terlarut (Na, K, Ca, dan Mg) di dalam larutan tanah, dinyatakan dalam  $\mu\text{mhos/cm}$ , atau  $\text{mmhos/cm}$ , atau  $\text{decimhos/cm}$ . Paling banyak digunakan satuan  $\text{mmhos/cm}$ . Dalam satuan SI (Satuan Internasional), satuan DHL dinyatakan dalam siemen/meter (1 siemen = 1 mho, sehingga  $1 \text{ S/m} = 10 \text{ mmhos/cm}$ ). Kadar garam ( $\text{mg/L}$ ) dirumuskan

sebagai DHL (mmhos/cm)  $\times$  640 (Bohn, McNeal & O'connor 1979). Ketersediaan unsur hara dalam tanah garam (salin, sodik, atau salin-sodik) sangat bergantung pada kadar garam tanah. Tanah Salin adalah tanah garam yang mengandung DHL  $>$  4 mmhos/cm, pH  $<$  8,5, SAR  $<$  15%. Tanah Sodik adalah tanah yang mengandung DHL  $<$  4 mmhos/cm, pH  $>$  8,5, SAR  $>$  15%. Tanah Salin-Sodik adalah tanah yang mengandung DHL  $>$  4 mmhos/cm, pH  $<$  8,5, SAR 15 % (Awatt Project 2009). Kadar garam tanah dipengaruhi oleh kadar Na, Ca, Mg, DHL, dan pH tanah. Unsur hara yang tersedia dalam tanah adalah Na, K, Ca, dan Mg.

### **Mineral Tanah**

Mineral tanah merupakan penyusun tanah yang berasal dari pelapukan batuan beku, metamorf, atau sedimen. Hakim dkk (1986) mengatakan bahwa mineral tanah melapuk akan menghasilkan ketersediaan unsur hara dalam tanah dan mineral tanah sebagai bahan baku pupuk. Mineral tanah terdiri atas mineral primer (felspar, ortoklas, oligoklas, plagioklas, biotit, hornblende, dan apatit), dan mineral sekunder (mineral klei, oksida/hidroksida besi/aluminium).

Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) mineral tanah ditentukan oleh substitusi isomorfik, yang menghasilkan muatan permanen (*permanent charge*), atau bergantung pada pH tanah, yang menghasilkan muatan terubahkan (*variable charge*). Substitusi

isomorfik adalah proses penggantian  $\text{Si}^{4+}$  atau  $\text{Al}^{3+}$  pada lapis aluminosilikat oleh kation yang valensinya lebih rendah (misalnya  $\text{Mg}^{2+}$ ) sehingga meningkatkan kapasitas tukar kationnya. Peranan mineral klei untuk menjerap dan mempertukarkan kation dan menahan air sehingga tanah tidak kekurangan air.



## IV. Sifat, Perilaku, Mekanisme Serapan, dan Peranan Unsur Hara dalam Tanaman

### 4.1 Sifat dan Perilaku Unsur Hara

Sifat (*properties*) suatu unsur hara sangat dipengaruhi oleh faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal adalah unsur hara itu sendiri, sedangkan faktor eksternal adalah sumber, proses, iklim, dan makhluk hidup. Misalnya, unsur hara nitrogen (N) bersumber dari bahan organik dan pupuk anorganik (pupuk pabrik). Nitrogen berasal dari bahan organik lebih lama tersedia daripada nitrogen yang berasal dari pupuk pabrik, karena bahan organik lebih dahulu mengalami dekomposisi agar supaya dapat tersedia nitrogen bagi tanaman. Dekomposisi bahan organik berlangsung cukup lama lebih kurang 3 bulan, sedangkan pupuk pabrik seperti urea tidak perlu dekomposisi, cukup dilarutkan dalam air, nitrogen-urea mudah larut dalam air dan langsung dapat tersedia bagi tanaman. Proses ketersediaan unsur N

dari bahan organik melalui desintegrasi (dekomposisi fisik) dan dekomposisi bahan organik (kimia dan biologi). Desintegrasi bahan organik dimulai dengan pelapukan bahan organik, karena temperatur yang berubah-ubah dari panas ke dingin, dan dari basah ke kering karena hujan dan kemarau yang saling berganti setiap tahun. Jasad hidup makro (tikus dan cacing tanah) membantu proses desintegrasi bahan organik dalam tanah. Desintegrasi bahan organik menghasilkan bahan organik yang lebih lunak, berukuran lebih kecil, dan mudah diserang jasad hidup mikro (bakteri, jamur, dan cendawan). Jasad hidup tanah (makro dan mikro) menggunakan bahan organik sebagai sumber karbon (C) untuk energi. Energi ini digunakan jasad hidup tanah untuk kelangsungan hidupnya (metabolisme). Dekomposisi bahan organik secara kimia dan biologi berlangsung setelah selesai desintegrasi bahan organik. Air hujan, sekresi, eksudat akar berpengaruh terhadap dekomposisi kimia bahan organik. Biasanya proses dekomposisi bahan organik di dalam tanah berjalan bersama-sama dekomposisi fisik, kimia, dan biologi. Dekomposisi bahan organik melepaskan unsur hara N, P, K, dan S ke dalam tanah. Unsur hara ini dapat diserap tanaman, dijerap klei tanah, atau disemat (*fixation*) jasad renik tanah. Iklim sangat berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara di dalam tanah. Musim hujan menyebabkan terjadi pelarutan unsur hara dari bahan induk tanah, mineral

tanah, atau bahan organik tanah. Musim kemarau menyebabkan pelarutan unsur hara sangat kecil sehingga unsur hara dijerap mineral klei tanah atau tertimbun di dalam profil tanah bagian bawah. Makhluk hidup adalah jasad hidup tanah, tanaman, dan hewan yang berperan untuk menyediakan unsur hara bagi tanaman. Jasad hidup tanah (bakteri, cendawan, jamur, cacing tanah, colembola, dan rayap) mampu melaksanakan dekomposisi bahan organik menjadi humus tanah. Pelepasan unsur hara terjadi ketika dekomposisi bahan organik berlangsung terutama unsur nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan belerang (S). Tanaman sebagai sumber bahan organik dengan bantuan jasad hidup tanah dapat didekomposisi dan melepaskan unsur N, P, K, dan S ke dalam tanah. Hewan dapat menyumbangkan unsur hara ke dalam tanah melalui kotorannya yang banyak terdapat di permukaan tanah.

Perilaku (*behavior*) suatu unsur hara berkaitan dengan sifat (*properties*) unsur hara tersebut. Misalnya, nitrogen bersifat gas  $N_2$  atau NO dengan perilaku  $N_2$  atau NO sangat ringan sehingga mudah hilang ke atmosfer bumi. Perilaku unsur hara sangat menentukan ketersediaan unsur hara di dalam tanah.

Unsur hara esensial ialah unsur hara yang dibutuhkan mutlak untuk menyelesaikan siklus hidup tanaman, tanpa unsur hara ini tanaman tidak mampu melangsungkan siklus hidupnya. Fungsi unsur hara

esensial tidak dapat digantikan oleh unsur hara yang lain, dan fungsinya sangat khusus (Prasad & Power 1997). Unsur hara esensial yang dikenal berjumlah 16. Unsur hara esensial sebagai berikut: karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), belerang (S), kalsium (Ca), magnesium (Mg), semuanya disebut unsur hara makro, besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), seng (Zn), molibdenum (Mo), boron (B), dan khlor (Cl), semuanya disebut unsur hara mikro. Selain unsur hara esensial, unsur hara yang bermanfaat bagi kehidupan jasad hidup adalah natrium (Na), dan silika (Si) (Mengel & Kirby 1987). Masing-masing unsur hara esensial mempunyai sifat dan perilaku yang berbeda satu sama lain. Berikut ini akan diterangkan satu per satu unsur hara tersebut.

## 4.2 Nitrogen (N) dalam tanah

Nitrogen merupakan unsur hara esensial yang pertama, banyak dijumpai di lapisan atmosfer bumi, sekitar 79% dari volume atmosfer bumi, tetapi keberadaannya tidak tersedia bagi tanaman, karena berbentuk gas  $N_2$  (Foth 1984, Hakim dkk 1986, Prasad & Power 1997, Hodges 2011). Penyediaan N tanah dapat dengan proses penyematan dan lompatan listrik ketika terjadi petir. Proses penyematan (*fixation*) dan denitrifikasi bertanggung jawab terhadap ketersediaan N dalam tanah. Peristiwa  $N_2$  atmosfer berubah bentuk menjadi N tersedia bagi tanaman disebut penyematan

N. Penyematan  $N_2$  dari atmosfer dapat dilakukan oleh jasad renik tanah, dengan 2 cara, simbiotik dan non simbiotik. Penyematan  $N_2$  secara simbiotik melibatkan jasad renik tanah (*Rhizobium Spp*) dan tanaman legum (kedelai dan kacang tanah). Penyematan  $N_2$  secara non simbiotik hanya melibatkan bakteri hidup bebas (genus *Azotobacter* dan *Clostridium*). *Azotobacter* hidup bebas di dalam tanah yang pH > 6, aerasi tanah baik, kaya bahan organik tanah, cukup unsur hara Ca dan P, lengas tanah cukup, dan temperatur tanah yang cocok (Foth 1984). Penyematan  $N_2$  simbiotik memberikan jumlah N 10 x lebih besar daripada penyematan  $N_2$  non-simbiotik, artinya dari segi agronomi, penyematan  $N_2$  simbiotik sangat penting, karena memberikan kontribusi N yang besar dan dapat menggantikan pupuk N anorganik.

Bahan organik dan bahan anorganik juga sebagai sumber unsur hara N tanah. Nitrogen dari bahan organik lambat tersedia dibandingkan dengan N anorganik dari pupuk anorganik (misalnya urea). Bahan organik akan melepaskan N organik ketika terjadi dekomposisi bahan organik dengan bantuan jasad renik tanah, seperti bakteri dan cendawan. N organik diubah menjadi N anorganik dengan bantuan jasad renik tanah menghasilkan nitrogen tersedia bagi tanaman. Nitrogen tersedia yang dapat diserap tanaman berbentuk  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$ , dan/atau  $NO_3^-$ . Nitrogen dari pupuk anorganik mudah larut dalam air

dan langsung dapat diserap tanaman, dan sebagian dapat tercuri dalam bentuk  $\text{NO}_3^-$  dan menguap berupa gas  $\text{NH}_3$ . Siklus N sangat berperan dalam ketersediaan N. Penyematan N secara biologi merupakan komponen penting dalam keberlanjutan pertanian. Penyematan N secara biologi mampu mengubah  $\text{N}_2$  atmosfer ke bentuk N yang dapat diserap tanaman melalui enzim nitrogenase. Asupan N dari penyematan N ini dapat memelihara cadangan N tanah dan menggantikan N anorganik dari pupuk, dan memelihara hasil tanaman yang tinggi. Jumlah N simbiotik yang disemat dilaporkan 360 kg N ha (Bohloul et al 1992). Sebagai perbandingan bila industri pupuk N mensintesis senyawa N dari gas  $\text{N}_2$ , maka diperlukan energi 22.000 Kcal/kg pupuk N yang dihasilkan (Bohloul et al 1992). Biaya pembuatan bangunan pabrik berskala medium dibutuhkan lebih dari 100 juta dolar AS. Biaya yang besar sangat menyulitkan negara sedang berkembang (Indonesia misalnya) untuk memperluas pabrik ke daerah-daerah yang termasuk wilayah RI. Alternatifnya, produksi N secara biologi sangat menjanjikan dan sangat cocok dengan iklim kita. Estimasi jumlah  $\text{N}_2$  yang disemat disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Estimasi jumlah N<sub>2</sub> yang disemat secara asosiasi hidup bebas dan simbiotik

Sistem Penyematan N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> tersemat (kg N ha <sup>-1</sup> )
Asosiasi hidup bebas	
Padi-ganggang giru-hijau	10-80 tan <sup>-1</sup>
Padi-bakteri	10-30 tan <sup>-1</sup>
Tebu-bakteri	20-160 tan <sup>-1</sup>
Simbiotik	
Padi-Azolla	20-100 tan <sup>-1</sup>
Leucaena leucocephala	100-300 tahun <sup>-1</sup>
Glycine max	0-237 tan <sup>-1</sup>
Trifolium repens	13-280 tan <sup>-1</sup>
Sesbania rostrata	320-360 tan <sup>-1</sup>

Sumber: Bohlool et al 1992

Fluks N tanah dari penyematan N<sub>2</sub> secara biologi dihitung berkisar 139-170 x 10<sup>6</sup> ton N ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> (People & Craswell 1992). Meskipun angka fluks N tanah masih dipertanyakan, tetapi paling tidak angka ini menunjukkan bahwa penyematan N<sub>2</sub> secara biologi sangatlah penting dari segi siklus N. Jumlah N yang disemat kecil dibandingkan cadangan N total (105.000 x 10<sup>6</sup> ton N), paling tidak beberapa kali lipat lebih besar daripada asupan N dari pupuk N (65 x 10<sup>6</sup> ton N) (People & Craswell 1992). Asupan N dari penyematan N<sub>2</sub> diperoleh dari sistem simbiotik: Legum-Rhizobium spp, Casuarina-Frankia, Azolla-Anabaena. Kontribusi penyematan N<sub>2</sub> secara simbiotik 70% dan non-

simbiotik 30% (People & Craswell 1992), tetapi di dalam tanah yang subur asupan  $N_2 > 80\%$  dari total N (People & Craswell 1992).

Ammonium ( $NH_4$ ) dapat diserap tanaman langsung, tetapi nitrat ( $NO_3$ ) diubah ke  $NH_4$  menggunakan energi dari fotosintesis. Ammonium mengikat karbon (C) membentuk asam glutamat, yang digunakan untuk menghasilkan asam amino. Asam amino bergabung dengan asam amino membentuk protein. Protein mengontrol pertumbuhan tanaman dengan aktifitas enzim. Tanaman yang cukup asupan N berwarna hijau dan pertumbuhan normal. Tanaman yang kahat N menjadi kerdil dan daun kuning. Khlorosis terjadi pada daun lebih tua. Kelebihan N menyebabkan tanaman tertunda pembentukan bunga atau buah, dan menyebabkan hasil tanaman rendah (Hodges 2011).

Revolusi hijau terjadi karena ditemukan teknologi pembuatan pupuk nitrogen oleh seorang ahli kimia, bernama Karl Bosch (pemenang Nobel bidang Kimia 1931). Ceritanya sebagai berikut: Pada awal abad 20, asupan N dari atmosfer, penyemat N oleh tanaman legum, dan pupuk organik tidak mencukupi kebutuhan bidang pertanian, karena tekanan penduduk yang besar. Sumber pupuk N yang murah dan berlimpah haruslah dikembangkan. Fritz Haber (pemenang Nobel bidang Kimia 1918) pertama kali mengembangkan teknik sintesis produksi ammonia

(NH<sub>3</sub>). Berdasarkan teknik Haber, Karl Bosch mengembangkan proses produksi ammonia yang ekonomis. Dengan pengembangan kompresor sentrifugal, penggunaan gas alam dan naphtha sebagai bahan dasar pupuk N yang murah dan berlimpah, biaya produksi ammonia berkisar 200 dolar US pada tahun 1940 sampai dengan 30 dolar US pada tahun 1972 (Gruhn, Goletti & Yudelman 2000). Sepanjang perkembangan varietas tanaman yang responsif, pupuk N anorganik memberikan dasar revolusi hijau.

### **4.3 Fosfor (P) dalam tanah**

Fosfor memegang peranan sebagai bahan bakar universal di dalam proses biokimia sel hidup (Foth 1984). Adenosin tri fosfat (ATP) berubah menjadi adenosin di fosfat (ADP) dan menghasilkan energi untuk proses biokimia sel hidup (tanaman).

Persoalan utama penyerapan P tanah oleh tanaman adalah rendahnya kelarutan P tanah dan konsentrasi P larutan tanah (Foth 1984). Ketersediaan P (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) larutan tanah sangat cepat bereaksi dengan ion lain sehingga P tidak tersedia untuk tanaman. Fosfor (P) bereaksi dengan Ca, Fe, dan Al tanah membentuk Ca-P, Fe-P, dan Al-P. Kation P sangat kuat dijerap mineral klei. Ketersediaan P yang dominan untuk tanaman adalah H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>.

Sumber utama P adalah bahan organik dan mineral tanah. Bahan organik dapat berasal dari sisa

jaringan tanaman (akar, batang, dan daun), tulang dan kotoran hewan (kelelawar, ikan, sapi, kambing, domba, kuda, dan ayam), pupuk hijau, dan pupuk kompos. Bahan organik didekomposisi dengan bantuan jasad renik menghasilkan unsur hara P, S, N, K, dan humus tanah. Mineral tanah penghasil P adalah mineral apatit terutama karbonat-apatit, khlor-apatit, fluor-apatit, dan hidroksi-apatit yang mengandung P 15 s.d 30%. Mineral apatit adalah sumberdaya alam yang tidak terbarukan (*unrenewable natural resources*). Bila ditambang terus menerus akan mengakibatkan kelangkaan sumber P alam seperti batuan fosfat. Fosfor (P) tanah dibagi ke dalam P-organik dan P-anorganik tanah.

P-organik tanah sangat beragam jumlahnya bergantung pada iklim, vegetasi, tekstur tanah, penggunaan tanah, pemupukan, drainase dan irigasi. Bentuk P-organik yang dikenal adalah inositol P, asam nukleat, dan fosfolipid. Inositol P dapat berbentuk fosfat ester myo-inositol, scyllo-inositol, neo-inositol, dan chrio-inositol tanah (Prasad & Power 1997). Myo-inositol hexophosphate acid atau asam pitat adalah pool utama P-organik. P-organik ini cukup stabil di dalam suasana alkalin, tetapi berangsur-angsur terhidrolisis ke inositol P intermediate dan akhirnya ke inositol di dalam suasana asam, hidrolisis optimum pada pH 4. Enzim fitase juga menghidrolisis myo-

inositol P. Inositol P berkisar < 1 s.d 62% dari total P-organik (Prasad & Power 1997).

Asam nukleat (RNA dan DNA) ditemukan di dalam semua makhluk hidup. P-organik tanah 50% berada dalam bentuk asam nukleat, tetapi ketika diidentifikasi dan diukur dengan alat khusus, ditemukan jumlah asam nukleat yang lebih rendah. Misalnya, asam fulvat tanah mengandung 1,2 s.d 6 mg P/kg setara dengan 0,2 s.d 1,8% P-organik tanah. Prasad dan Power (1997) menemukan kandungan asam nukleat tanah 0,1 s.d 97 mg P/kg setara dengan 0,1 s.d 65% P-organik dan nilai asam nukleat ini termasuk sangat tinggi.

Fosfolipid tanah berkisar 0,2 s.d 14 mg P/kg setara dengan < 5% P-organik (Prasad & Power 1997). Fosfolipid yang dominan dalam tanah adalah lechitin dan fosfatidil etanolamin.

Retensi P tanah dilakukan oleh mineral klei hidroksida Fe dan Al, mineral klei aluminosilikat, mineral karbonat tanah, dan bahan organik tanah. Retensi P oleh hidroksi Fe dan Al melibatkan  $\text{OH}^-$  dari mineral klei tersebut. Satu  $\text{OH}^-$  atau lebih dapat diikat oleh  $\text{PO}_4^{3-}$ . Bila satu  $\text{OH}^-$  yang diikat, jerapan  $\text{PO}_4^{3-}$  dikatakan *reversibel*, dan bila dua  $\text{OH}^-$  yang diikat, jerapan  $\text{PO}_4^{3-}$  dikatakan *irreversibel*. Istilah lain yang dipakai, bila dua  $\text{OH}^-$  yang diikat  $\text{PO}_4^{3-}$  maka jerapan  $\text{PO}_4^{3-}$  disebut bidentat atau binukleat. Ikatan antara  $\text{Al}^{3+}$  dengan  $\text{PO}_4^{3-}$  lebih lemah daripada ikatan  $\text{Fe}^{3+}$

dengan  $\text{PO}_4^{3-}$ . Fe-oksida non-kristal mempunyai luas permukaan klei  $400 \text{ m}^2/\text{g}$  sehingga memegang peranan lebih luas dalam jerapan  $\text{PO}_4^{3-}$  daripada Fe-oksida kristal yang mempunyai luas permukaan klei  $100 \text{ m}^2/\text{g}$  (Prasad & Power 1997).

Retensi P oleh mineral klei aluminosilikat kaolinit mirip dengan retensi P oleh Al-hidroksida. Kapasitas jerap P oleh mineral klei bergantung pada proporsi luas permukaan mineral klei. Kaolinit menyerap P lebih banyak daripada mineral klei 2:1 setiap luas permukaan klei.

Retensi P oleh mineral karbonat banyak dijumpai pada tanah kapur. Dua reaksi retensi P dengan kalsit: Pertama, pada konsentrasi P rendah, jerapan P oleh permukaan kalsit, diteruskan proses pembentukan kalsium fosfat kristal. Ke dua, pada konsentrasi P tinggi, reaksi pengendapan yang cepat dan berulang-ulang. Retensi P oleh  $\text{CaCO}_3$  kurang kuat daripada retensi P oleh hidroksida oksida Fe dan Al sehingga P lebih mudah tersedia bagi tanaman (Prasad & Power 1997).

Retensi P oleh bahan organik tanah sangat nyata dan melepaskan P ke dalam larutan tanah dan P tersedia bagi tanaman. Humus tanah berasosiasi dengan Ca, Fe, dan Al mampu mengikat P dan P mudah tersedia bagi tanaman.

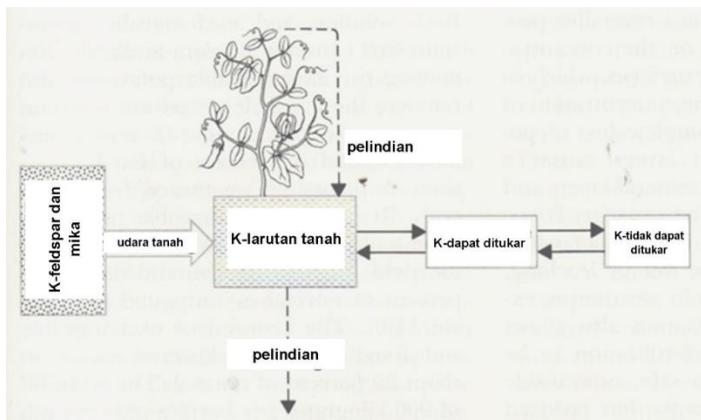
#### 4.4 Kalium (K) dalam tanah

Kalium adalah unsur hara esensial ke tiga setelah nitrogen dan fosfor tanah bagi tanaman (Bohn, McNeal, & O'Connor 1979). Kalium tanah berasal dari mineral tanah yang melapuk dan melepaskannya untuk pertumbuhan tanaman. Kisaran K tanah mineral 0,5 s.d 2,5% setara dengan 5 s.d 25 g K/kg tanah (Tisdale *et al* 1985, Prasad & Power 1997). Bahan induk tanah mengandung 40.000 s.d 50.000 kg K/ ha tanah (Foth 1984). Mineral tanah yang mengandung K adalah feldspar (mikrolin dan ortoklas), mika (muskovit dan biotit), dan klei, hidrous mika (Foth1984, Mengel & Kirby 1987, Prasad & Power 1997). Bila mineral tanah ini melapuk, akan melepaskan K ke dalam larutan tanah, dan tersedia bagi tanaman. Mika lebih mudah melapuk daripada feldspar, dan berada di dalam fraksi pasir dan debu tanah. Ketersediaan K larutan tanah bergantung pada penambahan dan pengurangan (terlindi dan tercuci) K. Penambahan K terjadi bila mineral tanah melapuk sehingga K dalam larutan tanah meningkat jumlahnya (atau dari sumber pupuk K). Ketika K tersedia di dalam larutan tanah diserap tanaman (atau tercuci dan terlindi) sehingga keseimbangan K antara K mineral tanah dan K larutan tanah terganggu, dengan cepat K mineral tanah beralih tempat menjadi K larutan tanah, dan sebaliknya. Keseimbangan K larutan tanah lebih mudah dipahami dengan mempelajari siklus K tanah

(Foth 1984, Gambar 15). Kalium yang diserap tanaman dalam bentuk  $K^+$  biasanya dinyatakan dalam  $K$ -tersedia atau  $K$ -tertukar. Kehilangan  $K$  tinggi melalui pencucian (drainase) karena sifatnya yang mudah larut dalam air. Kehilangan  $K$  tanah humid tropika adalah 20 kg/ha (Hakim dkk 1986). Kehilangan  $K$  lebih tinggi lagi karena diserap tanaman yang mengkonsumsi  $K$  berlebihan. Yang dimaksud dengan konsumsi  $K$  berlebihan ialah terjadi peningkatan serapan  $K$  oleh tanaman, tetapi tidak diikuti oleh peningkatan hasil atau produksi pertanian (Hakim dkk 1986). Konsumsi  $K$  berlebihan adalah pemborosan terutama bila semua hasil panen tanaman diangkut dari lapangan, tidak ada yang dikembalikan ke dalam tanah berupa pupuk hijau. Neraca  $K$  tanah ditentukan oleh penambahan  $K$  dan kehilangan  $K$  larutan tanah (Nyakpa dkk 1988). Penambahan  $K$  tanah dapat berasal dari pupuk hijau, pupuk kotoran hewan, pupuk anorganik, mineral tanah dan air irigasi, sedangkan kehilangan  $K$  tanah melalui terangkut panen tanaman, tercuci, terlindi, erosi, dan penyematan oksida/hidroksida besi dan aluminium. Tanah mineral yang mempunyai  $KPK$  yang tinggi mampu menyemat  $K$  lebih tinggi daripada tanah mineral yang  $KPK$ nya rendah. Kalium ( $K$ ) tanah yang tidak tersemat oleh tanah akan mudah tercuci oleh air (hujan dan drainase). Misalnya tanah pasir yang  $KPK$ nya sangat rendah dan tanah klei yang  $KPK$ nya sangat tinggi, ke duanya mempunyai sifat

satu lebih kecil menyemat K, sedangkan yang lain lebih tinggi dan kuat menyemat K. Sifat tanah ini sangat penting dalam teknologi pupuk K. Pupuk K yang diberikan kepada tanah pasir lebih sedikit dan seringkali diberikan, sedangkan kepada tanah klei (aktif) lebih banyak pupuk diberikan dan hanya sekali dalam setahun. Tanah berasal dari lava gunung berapi sangat kaya K, 250 kg K/Ha tanah (Bohn et al. 1979).

Tanah gambut mempunyai KPK yang tinggi, tetapi mempunyai kemampuan mengikat K sangat rendah, akibatnya K dapat cepat tercuci air hujan dan hilang dari tanah gambut. Pemupukan K pada tanah gambut dilakukan lebih sering daripada tanah mineral, karena K larutan tanah mudah larut, tercuci, dan/atau terlindi.



Gambar 14. Siklus K dalam tanah (Sumber: Foth 1984)

#### **4.5 Belerang (S) dalam tanah**

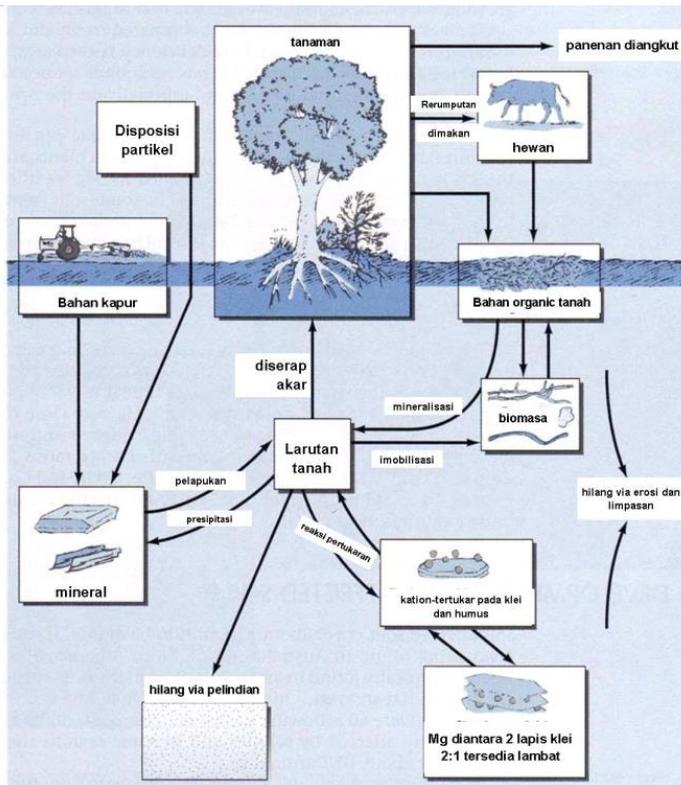
Belerang adalah unsur hara esensial dalam sintesis khlorofil, fotosintesis, asam amino/protein, dan vitamin (van scholl & Nieuwenhuis 2004). Belerang memegang peranan penting dalam pembentukan minyak pada biji (Hodges 2011). Bentuk S tanah yang utama adalah sulfat ( $\text{SO}_4^-$ ). Oksidasi S dengan bantuan bakteri *Thiobacillus* menghasilkan sulfat. Proses oksidasi S memberikan sejumlah asam dan menurunkan pH tanah. Belerang tidak kuat diikat tanah dan mudah terlindi. Kekahatan S tidak biasa terjadi dalam tanah, di atmosfer banyak terdapat S, karena penggunaan bahan bakar fosil dan proses pembakaran minyak. Asupan utama S ke dalam tanah adalah  $\text{SO}_2$  atmosfer dan air laut (Foth 1984, Bohn et al.1979). Pembakaran batubara menghasilkan  $10^{11}$  kg S/tahun, proses minyak petroleum ( $3 \times 10^{10}$  kg S/tahun), dan peleburan biji tambang ( $1,5 \times 10^{10}$  kg S/tahun), dan dari laut ( $2 \times 10^{10}$  kg S/tahun). Siklus S dalam tanah disajikan Gambar 4.

#### **Kalsium (Ca) dan Magnesium (Mg) dalam tanah**

Kalsium sebagai penyusun dinding sel, komponen struktur tanaman, dan bersifat tidak bergerak di dalam sel tanaman. Kalsium juga melindungi tanaman dari kekeringan, kegaraman, dan cekaman (Prasad & Power 1997). Magnesium merupakan inti struktur molekul khlorofil dan

komponen penting fotosintesis, inti ribosom dan sintesis protein.

Kalsium dan magnesium tersedia dalam tanah sangat berkorelasi dengan tingkat pelapukan dan tingkat pencuciannya (Gambar 15).



Gambar 15. Siklus Ca dan Mg ((Sumber: Deenik 2005, Brady & Weil, 2004)

Pelapukan mineral Ca dan Mg menghasilkan Ca dan Mg tanah yang dapat diserap tanaman. Ca dan Mg tanah dapat tercuci dengan adanya pencucian, karena air hujan dan air drainase. Semakin tinggi tingkat pelapukan mineral Ca dan Mg semakin banyak tersedia Ca dan Mg tanah bagi tanaman. Sebaliknya, semakin tinggi tingkat pencucian semakin banyak Ca dan Mg tanah yang tercuci dari lapis olah tanah. Kalsium dan magnesium dijerap klei tanah dalam bentuk  $\text{Ca}^{+2}$  dan  $\text{Mg}^{+2}$ . Mineral penting yang mengandung kalsium tanah adalah feldspar, apatit, kalsit, Ca-fosfat, Ca-karbonat, dolomit, gipsum, amphibol. Mineral magnesium adalah biotit, dolomit, augit, serpentin, hornblende, dan olivin (Foth 1984, Hakim dkk 1986, Mengel & Kirby 1987).

Rata-rata komposisi kimia kerak bumi pada kedalaman tanah 16 km disajikan Tabel 3.

Tabel 3. Rata-rata komposisi kimia kerak bumi pada kedalaman tanah 16 km

Komposisi	Bobot (%)	Volume (%)	Komposisi	Bobot (%)	Volume (%)
O	46,46	91,77	H	0,14	0,06
Si	27,61	0,80	P	0,12	-
Al	8,07	0,76	C	0,09	0,01
Fe	5,06	0,68	Mn	0,09	-
Ca	3,64	1,48	S	0,06	-
Na	2,75	1,60	Cl	0,05	0,04
K	2,58	2,14	Lain-lain	0,52	0,10
Mg	2,07	0,56			

Sumber: Mengel & Kirby 1987

## 4.6 Besi (Fe) dalam tanah

Besi tanah merupakan unsur hara mikro yang terbanyak jumlahnya dibandingkan dengan unsur hara mikro yang lain, yaitu 200 ppm s.d 10% (Nyakpa dkk 1988, Kebede & Yamoah 2009, Hodges 2011). Kadar kritis Fe tanaman berkisar 53,04 – 14,30 ppm (Kebede & Yamoah 2009). Ketersediaan besi dalam tanah adalah  $Fe^{+3}$  dan  $Fe^{+2}$ . Bentuk  $Fe^{+2}$  tanah larut di dalam air, sedangkan bentuk  $Fe^{+3}$  mengendap sebagai mineral besi oksida atau besi sulfida. Kelarutan mineral besi oksida/hidroksida menurun dengan urutan sebagai berikut:  $Fe(OH)_3$  amorf >  $Fe(OH)_3$  tanah >  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  maghaemite >  $\gamma$ - $FeOOH$  lepidocrocite >  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  haematite >  $\alpha$ - $FeOOH$  goethite (Mengel & Kirby 1987). Besi dalam tanah ditemukan dalam bentuk  $Fe^{+3}$ -oksida dan  $Fe^{+2}$ -oksida, besi silikat, besi sulfida (pirit), dan besi karbonat ( $Fe^{+3}$ -karbonat dan  $Fe^{+2}$ - karbonat). Mineral primer yang mengandung besi adalah hornblende, biotit, dan klorit. Kelarutan besi dalam tanah dikontrol oleh kelarutan hidrous Fe-oksida (Hodges 2011). Besi dalam tanah mineral masam mengikat P membentuk Fe-P sehingga P tidak tersedia bagi tanaman. Ketersediaan  $Fe^{2+}$  dalam tanah mineral masam pada suasana anaerob, tanpa oksigen sangat tinggi dan meracuni tanaman (Prasad & Power 1997). Tanah yang tergenang secara berkala mengandung bercak merah karena  $Fe^{+3}$  dan bercak biru atau abu-abu karena mengandung  $Fe^{+2}$ . Tanah yang tergenang

permanen biasanya berwarna biru atau abu-abu karena dominan  $\text{Fe}^{+2}$  (Bohn, McNeal, & O'Connor 1979).

#### **4.7 Mangan (Mn) dalam tanah**

Mangan dijumpai dalam bentuk mineral Mn-oksida, Mn-karbonat, dan Mn-silikat (Hodges 2011). Mn total tanah ditemukan 20 - 4000 ppm (Kebede & Yamoah 2009, Hodges 2011) bergantung ordo tanah dan tipe mineral tanah. Meskipun Mn total sangat tinggi, tetapi tidak tersedia bagi tanaman. Indikator yang paling baik adalah Mn tersedia atau Mn terekstrak, karena langsung dapat diserap tanaman. Kadar kritis Mn tanaman berkisar 1,7 - 9,98 ppm (Kebede & Yamoah 2009) berada di dalam larutan tanah. Keracunan Mn terdapat pada tanah mineral masam. Interaksi Mn dengan Fe bersifat antogonis, kadar Mn dalam jaringan tanaman meningkat, sedangkan kadar Fe menurun, dan sebaliknya. Nisbah Fe/Mn berkisar 1,5 s.d 2,5 mampu memelihara kesehatan tanaman. Bila nisbah  $\text{Fe}/\text{Mn} > 2,5$  menyebabkan keracunan Fe, dan bila nisbah  $\text{Fe}/\text{M} < 1,5$  tanaman menderita keracunan Mn (Hodges 2011).

#### **4.8 Tembaga (Cu) dalam tanah**

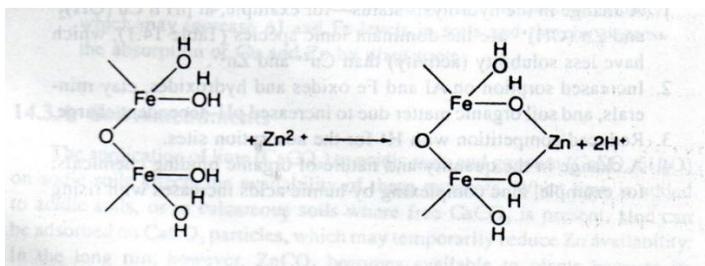
Mineral tanah sebagai sumber Cu tanah, Cu-sulfat, Cu-sulfida, Cu-karbonat, dan kadar Cu terbanyak dijumpai pada mineral *Calcopirit*, 34% Cu

(Hodges 2011). Tembaga ( $\text{Cu}^{+2}$ ) tersedia di dalam tanah, karena pelapukan mineral tanah dan langsung diserap tanaman. Kadar Cu kritis tanah berkisar 0,06 – 0,96 ppm (Kebede & Yamoah 2009). Tembaga diikat bahan organik tanah atau humus tanah membentuk kompleks Cu-humus tanah. Tembaga dari Cu-humus tanah tidak tersedia bagi tanaman (Foth 1984). Ketersediaan Cu menurun dengan meningkatnya pH tanah. Tembaga bersifat tidak bergerak di dalam tanaman. Tanah bertekstur pasir atau batu pasir dan batuan beku asam mengandung kadar Cu sangat rendah (Hodges 2011, Kebede & Yamoah 2009). Faktor yang mempengaruhi ketersediaan Cu tanah adalah pH, kadar humus atau bahan organik tanah, dan proporsi kadar pasir terhadap klei tanah, N, P, Zn, Mn, dan Mo (Kebede & Yamoah 2009, Hodges 2011). Ketersediaan Cu dalam tanah paling tinggi pada pH < 5 dan ketersediaannya berkurang pada pH > 7 (Hodges 2011).

#### **4.9 Seng (Zn) dalam tanah**

Mineral tanah sebagai sumber Zn tanah adalah sphalerit,  $\text{ZnS}$  dan smitsonit ( $\text{ZnCO}_3$ ) dan hemimorfit ( $\text{Zn}_4(\text{OH})_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), zinit ( $\text{ZnO}$ ) (Mengel & Kirby 1987, Hodges 2011). Zn total tanah berkisar 10 – 300 ppm dan Zn rata-rata tanah 50 ppm (Hakim dkk 1986, Mengel & Kirby 1987, Prasad & Power 1997, Munawar 2011). Ketersediaan  $\text{Zn}^{+2}$  tanah bagi tanaman berkisar

0,10 - 1,04 ppm (Kebede & Yamoah 2009). Tanah pasir dan tanah berkapur/alkalin mengandung kadar Zn yang rendah. Pemupukan P yang tinggi dapat menyebabkan kekahatan Zn tanah, karena terjadi pengikatan Zn-P (Foth 1984). Mineral oksida hidroksida Fe dan Al sangat kuat mengikat  $Zn^{+2}$  dengan ikatan spesifik atau nonspesifik sehingga  $Zn^{+2}$  tidak tersedia bagi tanaman (Gambar 16). Ketersediaan Zn tanah sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Kadar Zn tanah meningkat dengan menurunnya pH tanah, dan sebaliknya. Tanah yang dikapur dari pH 4,3 ke 5 ketersediaan Zn tanah sangat tajam menurun, dan penelitian lain mendapatkan bahwa pH tanah dinaikan menjadi 6,1 kadar Zn tersedia sebagai pembatas pertumbuhan tanaman (perkebunan). Ketersediaan Zn sangat rendah dijumpai pada tanah yang mengandung bahan organik tanah yang tinggi karena Zn-humus terbentuk dan Zn tidak tersedia bagi tanaman.



Gambar 16. Pengikatan  $Zn^{+2}$  oleh mineral oksida hidroksida Fe (Sumber: Prasad & Power 1997)

#### 4.10 Molibdenum (Mo) dalam tanah

Sumber molibdenum tanah banyak ditemukan pada mineral molibdenit, powelit, ferimolibdit, wulfenit, ilsemanit dan jordisit (Hodges 2011). Molibdenit, ferimolibdit, dan jordisit banyak ditambang. Kadar Mo dalam beberapa tipe batuan: batuan beku 0,9 - 7,0 ppm, debu (*shale*) 5 - 90 ppm, batu kapur, batu pasir, dan dolomit, < 3 - 30 ppm, debu hitam > 300 ppm, tanah 0,2 - 5,0 ppm (Prasad & Power 1997, Hodges 2011). Penyematan N simbiotik (*Rhizobium spp*), dan N nonsimbiotik (*Azotobacter chroococum*) memerlukan Mo (Prasad & Power 1997). Ketersediaan Mo berkorelasi negatif dengan ketersediaan Mn, Fe, Zn, dan Cu. Keberadaan belerang (S) tanah mampu menurunkan ketersediaan Mo, dan keberadaan P mampu meningkatkan Mo (Hodges 2011). Molibdenum banyak dijumpai pada tanah organik dan diserap tanaman dalam bentuk anion  $\text{MoO}_4^{2-}$ . Ketidak-tersediaan Mo terjadi pada tanah mineral masam, karena disemat oleh besi (Fe) sehingga tanaman tidak dapat menyerapnya. Tanah yang kaya Mo berasal dari batuan induk kapur (Foth 1984).

#### 4.11 Boron (B) dalam tanah

Boron tanah berasal dari mineral turmalin. Mineral tanah lapuk menghasilkan borat,  $\text{BO}_3^{3-}$  dan diserap tanaman (Foth 1984). Ketersediaan boron optimum pada pH tanah sekitar 7. Tanah mineral

masam atau tanah mineral alkalin mempunyai kadar boron yang rendah, karena boron terikat oksida/hidroksida Fe, Al atau Ca tanah. Boron penting untuk sintesis RNA (uracil) dan aktifitas sel (pembelahan sel, pemasakan, respirasi, dan pertumbuhan), dan memperbaiki stabilitas tabung serbuk sari. Boron total tanah berkisar 20 s.d 200 ppm dan B tersedia bagi tanaman dari 1 s.d 5 ppm dalam larutan tanah dan > 5 ppm B bersifat racun bagi tanaman.

#### **4.12 Khlor (Cl) dalam tanah**

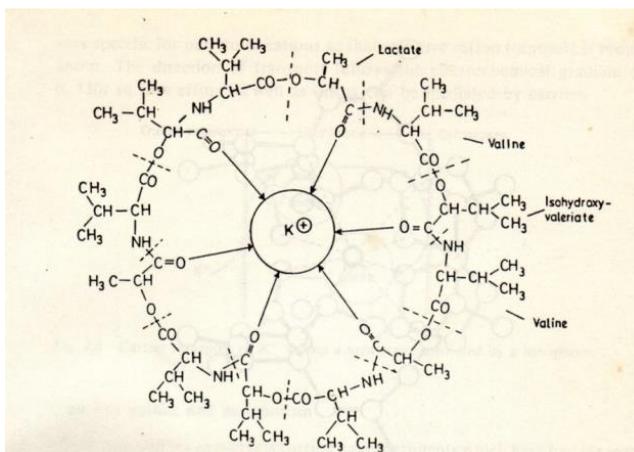
Khlor dibutuhkan tanaman dalam jumlah sangat banyak. Khlor kemungkinan berasal dari pupuk sangat kecil, biasanya dikenal dari pupuk KCl. Kebanyakan Cl berasal dari laut. Penyebaran Cl melalui curah hujan yang jatuh ke tanah (Foth 1984). Ketersediaan Cl lebih besar pada tanah arid (musim kering) daripada pada tanah humid (musim hujan) sehingga Cl dapat meracuni tanaman, terutama tanah salin berdrainase buruk. Penambahan Cl dari curah hujan berkisar 20 kg NaCl/ha/tahun (Hakim dkk 1986). Perilaku Cl yang tak dapat dijerap mineral klei dan bersifat mudah larut dalam air, dan mudah tercuci. Tanah yang mengandung Cl yang tinggi pada tanah yang dipengaruhi air laut, atau air irigasi yang banyak mengandung Cl, atau tanah berdrainase buruk. Tanah pasiran juga mengandung Cl yang tinggi (Mengel & Kirby 1987). Jaringan tanaman mengandung Cl

berkisar 50 s.d 500 mikromol/kg bobot kering tanaman, dan kawat Cl berkisar 2 s.d 20 mikromol/kg (Mengel & Kirby 1987). Anion Cl terlibat di dalam evolusi O<sub>2</sub> fotosistem II dalam fotosintesis. Dia mampu meningkatkan tekanan osmotik sel, mengatur stomata, dan meningkatkan air dalam jaringan tanaman, dan mampu menekan penyakit bintik daun pada gandum dan penyakit akar tanaman oat karena jamur.

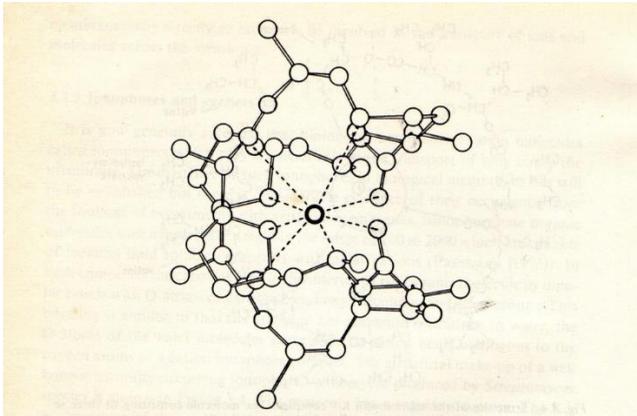
#### 4.13 Mekanisme Serapan

Serapan (*absorption*) unsur hara dilakukan oleh sel tanaman terutama sel meristematik akar berupa bulu-bulu akar yang jumlahnya sangat banyak. Mekanisme serapan unsur hara ini berjalan lancar ketika unsur hara siap tersedia untuk diserap tanaman. Mekanisme ketersediaan unsur hara di dalam tanah telah dibahas pada bab sebelumnya. Tiga mekanisme ketersediaan unsur hara adalah kontak langsung dengan akar tanaman (*intersepsi*), difusi, dan aliran massa. Mekanisme serapan unsur hara dengan cara antara lain: ionofor (pembawa ion), transpor pasif dan aktif. Ionofor adalah membran yang mengandung molekul organik, berfungsi sebagai pembawa ion. Ionofor mempunyai berat molekul berkisar 200 s.d 2000 dan mampu membentuk senyawa kompleks dengan kation dengan ikatan bipolar dengan atom O dari gugus fungsi karbonil, karboksil, alkohol, dan ether. Suatu contoh, valinomisin (ionofor) yang dihasilkan oleh *Streptomyces sp.* Kation K diikat 6 atom

O dari gugus karbonil yang membentuk cincin. Cincin ini dibentuk oleh laktat, valin, isohidroksi valeriate, dan valin. Ionofor terdiri atas ionofor netral dan ionofor karboksilat. Ionofor netral sebagai pembawa (ion) melintasi membran sel, sedangkan ionofor karboksilat mempertukarkan kation atau  $H^+$  pada gugus karboksilnya. Contoh ionofor netral adalah lipida depsipeptida yang monomernya asam amino dan asam hidroksi, misalnya valinomycin dan nonactin-K kompleks (Gambar 17-18, Mengel & Kirby 1987)



Gambar 17. Valmanocin K kompleks (Sumber: Mengel & Kirby 1987)



Gambar 18. Nonactin K kompleks (Sumber: Mengel & Kirby 1987)

Transpor pasif adalah dari segi termodinamika, transpor ion searah dengan gradien elektrokimia, sedangkan transpor aktif adalah transpor ion melawan gradien elektrokimia atau transpor ion yang memerlukan energi - tenaga kinetik dan tenaga listrik (Mengel & Kirby 1987). Untuk lebih jelasnya dapat disajikan persamaan di bawah ini.

$$E_m - E_{cal} = E_d \text{ (Mengel \& Kirby 1987)}$$

Adapun  $E_m$  = potensial elektron antara sel dan medium luar;  $E_{cal}$  = selisih potensial elektron dari persamaan Nernst; dan  $E_d$  = tenaga penggerak. Misalnya suatu kation, nilai  $E_d$  negatif berarti bahwa penyerapan kation pasif, dan  $E_d$  positif berarti penyerapan kation aktif. Untuk anion sebaliknya. Nilai negatif  $E_d$  menunjukkan bahwa penyerapan anion aktif, dan  $E_d$

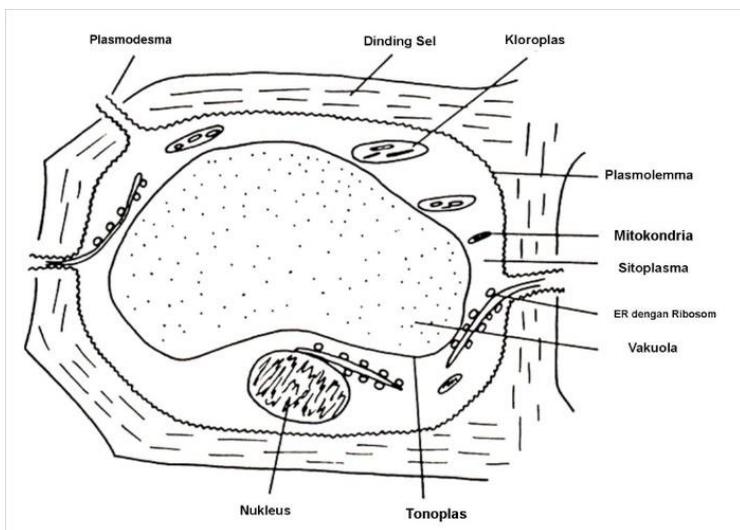
positif berarti penyerapan anion pasif. Hasil penelitian penyerapan ion  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , dan  $\text{Cl}^-$  oleh *Nitella* disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Nilai potensial elektron terukur ( $E_m$ ) dan terhitung ( $E_{cal}$ ) dan tenaga penggerak ( $E_d$ ) pada percobaan penyerapan ion pada *Nitella translucens*

Ion	$E_m$	$E_{cal}$	$E_d$	Serapan
$\text{Na}^+$	-13	-67	-71	pasif
$\text{K}^+$	-138	-179	+41	aktif
$\text{Cl}^-$	-138	+99	-237	aktif

Sumber: Mengel & Kirby 1987

Dasar mempelajari mekanisme serapan ion adalah pengetahuan sel tanaman, membran tanaman, permeabilitas membran, dan konsentrasi ion (Mengel & Kirby 1987). Sel tanaman adalah satuan terkecil dari jaringan hidup tanaman. Salah satu organ tanaman yang sangat penting disebut sel mesofil (Gambar 19, Mengel & Kirby 1987).



Gambar 19. Sel mesofil (Sumber: Mengel & Kirby 1987)

Struktur dinding sel tanaman terbentuk dari senyawa pektat dan selulosa. Selulosa membentuk cincin dikenal dengan mikrofibril. Intermikrofibril jalan masuknya air, udara, dan partikel padat ke dalam dinding sel. Membran plasma atau plasmalema adalah membran pembatas antara sitoplasma dan dinding sel. Tonoplas adalah membran yang memisahkan antara sitoplasma dengan vacuola. Sitoplasma merupakan organ terpenting di dalam sel, berisi inti sel, khloroplas, dan mitokondria. Khloroplas adalah organ tempat terjadinya konversi energi cahaya dan asimilasi CO<sub>2</sub>. Enzim mengatur metabolisme siklus asam trikarboksilat, respirasi, dan asam lemak. Ribosom adalah molekul super terdiri atas asam nukleat dan

protein. Beberapa ribosom bergabung menjadi Endoplasmik Retikulum (ER), terdiri atas ER dengan ribosom disebut ER kasar, dan tanpa ribosom disebut ER halus. Fungsi ER adalah memproduksi bahan yang digunakan di dalam sintesis membran, yaitu membran plasma. Vacuola berisi larutan yang mengandung ion anorganik dan senyawa organik dengan berat molekul rendah seperti asam organik. Vacuola juga sebagai tempat cadangan makanan seperti gula, nitrat, dan fosfat.

#### **4.14 Peranan, Kahat, dan Toksik Unsur Hara dalam Tanaman**

Peranan unsur hara esensial dalam tanaman secara umum dikelompokkan ke dalam 4 bagian, yaitu kelompok 1 unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan belerang (S) berperan sebagai bahan utama senyawa organik; kelompok 2 unsur fosfor (P) dan boron (B) berperan transfer energi dalam reaksi kimia dan pergerakan karbohidrat; kelompok 3 unsur kalium (K), magnesium (Mg), kalsium (Ca), dan khlor (Cl) berperan memelihara keseimbangan ion, bagian senyawa organik; kelompok 4 unsur tembaga (Cu), besi (Fe), mangan (Mn), molibdenum (Mo), dan seng (Zn) berperan transportasi elektron dan katalisator enzim (Mengel & Kirby 1987).

Kahat dan toksik adalah dua istilah yang bermakna negatif, kahat atau kurang, dan toksik atau beracun. Kahat atau toksik suatu unsur hara mengacu kepada kebutuhan suatu unsur hara bagi tanaman. Bila suatu tanaman kahat atau toksik suatu unsur hara menyebabkan pertumbuhan dan/atau perkembangan tanaman terhambat atau terganggu. Suatu tanaman terhambat pertumbuhan dan perkembangannya dapat dilihat dari gejala pertumbuhan dan perkembangannya, seperti perubahan warna daun, terbentuk bercak-bercak pada daun, atau tanaman mengalami kelainan bentuk seperti kuncup yang tidak kembang, atau akar tanaman kerdil, batang pendek, dan buah tidak normal. Gejala-gejala kahat dan/atau toksik suatu unsur hara mempunyai bentuk yang khas dan merupakan ciri dari gejala kahat atau toksisitas suatu unsur hara. Misalnya, kahat N ditunjukkan dengan warna daun kuning pada daun tua, dimulai dari pinggir daun menuju ke tulang daun, atau akar tanaman pendek, tebal, dan menggulung. Lebih rinci peranan dan gejala kahat masing-masing unsur hara esensial dibahas satu per satu di bawah ini.

Nitrogen (N) mampu membangun protein tanaman. Juga sebagai penyusun sel hidup, enzim, dan klorofil tanaman (Hakim dkk 1986). Nitrogen juga mampu sintesis asam amino, protein, klorofil, asam nukleat, dan koenzim (Prasad & Power 1998). Bila tanaman cukup N, pertumbuhan tanaman akan

membesar, tetapi bila kahat N, pertumbuhan tanaman akan terhambat, daun kecil dan tanaman kerdil. Bila tanaman kahat N, warna daun tua kuning dan tanaman terlambat berbunga. Kelebihan N, batang dan daun tanaman akan membesar, tetapi lemah, biji-bijian lebih mudah layu, jamur dan burung mempunyai kesempatan besar merusak tanaman. Tanaman berlebihan N akan terlambat berbunga, yang memacu hasil tanaman lebih rendah, mudah terserang penyakit dan mudah luka, karena jaringan tanaman lunak (Foth 1984 van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Fosfor (P) berperan dalam pernapasan dan asupan energi. Juga P membangun akar tanaman muda. Juga berpengaruh positif terhadap jumlah biji dan berat biji. Fosfor (P) juga penyusun sel hidup, fosfolipid, nukleoprotein, fitin, transfer energi dalam sel tanaman, mengubah karbohidrat ke gula, dan efisiensi khloroplas (Hakim dkk 1986). Fosfor juga ikut aktif dalam proses transfer metabolit, ATP, ADP, fotosintesis, dan respirasi, juga komponen fosfolipid (Prasad & Power 1998). Kahat P menyebabkan pertumbuhan tanaman kerdil terutama akar, pucuk tanaman, daun berwarna hijau-biru, beberapa tanaman ungu (Foth 1984). Perkembangan biji dan buah sangat kecil atau bahkan tidak ada sama sekali. Berlebihan P secara langsung berdampak buruk terhadap tanaman, dan kahat seng (Zn), tembaga (Cu), dan besi (Fe) (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Kalium (K) berperan memperkokoh berdirinya tanaman, translokasi karbohidrat, ketebalan dinding sel dan kekuatan batang tanaman (Foth 1984). Kalium membuat tanaman kuat dan sistem akar banyak dan bercabang luas. Juga memacu perkembangan akar, dan berdampak positif terhadap ukuran buah dan berat biji. Kalium juga berfungsi membantu serapan unsur hara, pengaturan pernapasan, transpirasi, dan kerja enzim (Hakim dkk 1986). Kalium juga berperan aktifasi, stabilitas dan konfigurasi enzim, membuka dan menutup stomata, fotosintesis, mengatur tekanan osmotik sel, transportasi fotosintat, sintesis protein, netralisasi asam organik, dan fotorespirasi (Munson 1982). Kalium juga terlibat dalam pembentukan gula dan tepung, metabolisme lemak, dan penyematan N, netralisasi asam organik (Prasad & Power 1998). Kekurangan K, batang tanaman mudah patah, kecil dan lemah, daun mudah rontok, berbintik warna pucat, dimulai dari tepi daun. Kemudian seluruh daun berubah warna menjadi coklat. Biji tanaman lebih mudah rontok. Tanaman yang mengandung K sedikit kurang mampu menahan kekeringan, dan lebih mudah layu. Kelebihan K, daun tanaman dan produk panen berair. Juga menyebabkan ketersediaan Mg dan B sangat terbatas (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Belerang (S) dibutuhkan membangun senyawa organik dan vitamin dalam tanaman. Belerang sebagai

penyusun komponen asam amino, sistin dan metionin, dan banyak dijumpai pada tanaman penghasil minyak (Hakim dkk 1986). Kahat S, daun berwarna hijau terang atau kekuningan, gejalanya sama dengan gejala kahat N (Foth 1984). Pertumbuhan tanaman kerdil dan batang tanaman kurus tipis dan berkayu. Kelebihan S jarang terjadi (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Kalsium (Ca) sebagai penyusun dinding sel, kalsium pektat atau kalsium oksalat, mempengaruhi pertumbuhan jaringan meristematik dan kekuatan tanaman (Hakim dkk 1986). Kalsium juga berperanan mengontrol metabolisme (enzim), penyusun struktur membran sel, struktur dinding sel, dan meningkatkan ketersediaan molibdenum, tetapi menurunkan ketersediaan unsur mikro (Munson 1982). Kalsium juga sebagai komponen dinding sel, terlibat dalam pertumbuhan sel dan pembelahan sel, dan kofaktor enzim (Prasad & Power 1998). Kahat Ca muncul pertama kali di daun muda. Daun tanaman seringkali kelainan bentuk, kecil dan hijau gelap (Foth 1984). Titik tumbuh tanaman mati. Daun menggulung. Pertumbuhan akar jelas tampak terhambat, dan busuk akar, dan batang tanaman lemah (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Magnesium (Mg) sebagai penyusun khlorofil yang dibutuhkan tanaman untuk fotosintesis dan membantu translokasi fosfor dalam tanaman (Hakim dkk 1986, Prasad & Power 1998). Magnesium juga

berfungsi membantu aktivasi enzim yang berhubungan dengan transfer energi (fotosintesis, glikosis, siklus asam trikarboksilat, respirasi, dan reduksi sulfat (Munson 1982). Selanjutnya dikatakan Munson bahwa magnesium juga berfungsi membentuk organel sel, metabolisme karbohidrat, dan sintesis protein. Kahat Mg, timbul gejala bintik pada daun tanaman, dimulai dari daun lebih tua. Daun seringkali kehilangan warna hijau, dan kadang-kadang terjadi daun prematur (kecil-kecil). Pada tanaman biji-bijian, seringkali muncul garis-garis kuning sepanjang daun. Pada tanaman tembakau terjadi peristiwa khlorosis disebut *sand drown* karena kahat Mg. Tanaman kapas memberikan warna daun merah keunguan dengan tulang daun hijau juga karena kahat Mg. Daun sorgum dan jagung menjadi bergaris-garis, tulang daun ungu pada sorgum dan kuning pada jagung. Tanaman kedelai yang kahat Mg menunjukkan daun khlorotik (Foth 1984 ). Kahat Mg tanaman menghambat masaknya biji. Kelebihan Mg jarang terjadi (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Besi (Fe) berperan dalam aktivasi enzim tanaman, fumarat hidrogenase, katalase, oksidase, dan sitokrom. Juga mempengaruhi produksi khlorofil, karena besi berasosiasi dengan sintesis protein khloroplastik. Besi juga mampu mengganti tempat Mo sebagai kofaktor logam yang diperlukan untuk enzim nitrat reduktase di dalam kedelai (Foth 1984, Hodges

2011). Besi juga sebagai komponen struktur sitokrom, perikhrom, dan leghemoglobin, terlibat dalam proses oksidasi-reduksi, respirasi, dan fotosintesis (Prasad & Power 1998). Kahat Fe pertama kali muncul di daun muda dan mengurangi pertumbuhan tanaman baru. Khlorosis daun muda terjadi dikenal dengan nama *iron-chlorosis*, kahat Fe yang akut daun dari hijau menjadi warna putih (Foth 1984, Hodges 2011).

Mangan (Mn) dibutuhkan beberapa enzim dalam metabolisme asam organik, fosfor, dan nitrogen. Mangan mereduksi nitrat ke amonia dan terlibat dalam fotosintesis. Terlibat dalam beberapa enzim dalam respirasi dan sintesis protein. Mangan juga terlibat dalam fotosintesis, evolusi oksigen, proses oksidasi-reduksi, dekarboksilasi, dan hidrolisis (Prasad & Power 1998). Kahat Mn terjadi khlorosis antar tulang daun dan warna tulang daun hijau gelap. Kahat Mn akut, daun coklat dan warna tembaga. Pada tanaman jagung, kahat Mn terjadi daun hijau terang dengan garis-garis kuning paralel. Tanaman yang peka terhadap kahat Mn adalah kacang-kacangan, selada, bawang merah, kentang, sorgum, kedelai, rumput Sudan, gandum, tomat, kacang-kacangan, oat, dan tembakau (Foth 1984, Hodges 2011).

Tembaga (Cu) berperan penting dalam sistem enzim tanaman, bagian khlorofil, katalisator respirasi, karbohidrat, dan protein (Prasad & Power 1998). Kahat Cu menyebabkan menurunnya

fotosintesis, respirasi, distribusi karbohidrat, metabolisme N, metabolisme dinding sel, kadar air, produksi biji, dan ketahanan terhadap penyakit (Hodges 2011). Kahat Cu menyebabkan terjadinya kantong-kantong resin di bawah kulit kayu, dan mati pucuk terjadi pada tanaman buah-buahan. Pucuk daun lebih tua mati pada tanaman biji-bijian (Foth 1984).

Seng (Zn) berperan dalam nutrisi tanaman dan fungsi enzim, stabilitas sitoplasma ribosom, proses oksidasi, transformasi karbohidrat dan sintesis auksin atau IAA (Hodges 2011). Seng juga terlibat dalam pembentukan auksin dan kloroplast, metabolisme karbohidrat, stabilitas dan struktur protein membran (Prasad & Power 1998). Kahat Zn terjadi pada tanaman jagung, sorgum, jeruk, tanaman buah-buahan, kacang-kacangan, sayuran, dan tanaman hias (Foth 1984). Kahat Zn tampak pertumbuhan tanaman kerdil, warna daun muda putih - daun putih pada jagung; daun warna karat pada padi, dikenal dengan penyakit *khaira* (Prasad & Power 1998).

Molibdenum (Mo) berperan penting dalam sistem enzim. Dua enzim penting yang membutuhkan Mo adalah nitrat reduktase dan nitrogenase. Nitrat reduktase mampu mereduksi  $\text{NO}_3$  ke  $\text{NO}_2$ , suatu langkah pertama pembentukan N-protein. Nitrogenase mampu mereduksi  $\text{N}_2$  atm ke  $\text{NH}_3$ , suatu proses yang penting penyematan N tanaman legum dari atmosfer (Hodges 2011). Molibdenum juga terlibat dalam

persemaian, dan pertumbuhan kantong serbuk-sari, pembuahan, pembelahan sel, dan metabolisme N (Prasad & Power 1998). Kahat Mo pada tanaman bunga matahari menunjukkan daun berbentuk mangkuk atau piala, dan cenderung daun memanjang dan berbentuk silinder, dikenal dengan gejala *whiptail* (Foth 1984).

Boron (B) berperan penting dalam transportasi unsur hara, pembentukan tabung serbuk-sari, pembentukan bunga, translokasi N dan gula dari daun ke buah, pembentukan asam amino dan protein, dan penyerapan P dan air (Hodges 2011). Boron juga sebagai komponen esensial nitrat reduktase dan nitrogenase, dan penyematan N (Prasad & Power 1998).

Khlor (Cl) berperan dalam pertumbuhan tanaman. Kahat Cl, tanaman menunjukkan layu pucuk daun, khlorosis daun, berwarna tembaga, nekrosis daun, dan tanaman tidak menghasilkan buah (Hodges 2011). Khlor juga terlibat dalam evolusi fotosistem II dalam fotosintesis, dan meningkatkan tekanan osmotik sel (Prasad & Power 1998).



## V. Faktor-faktor Penentu Kesuburan Tanah

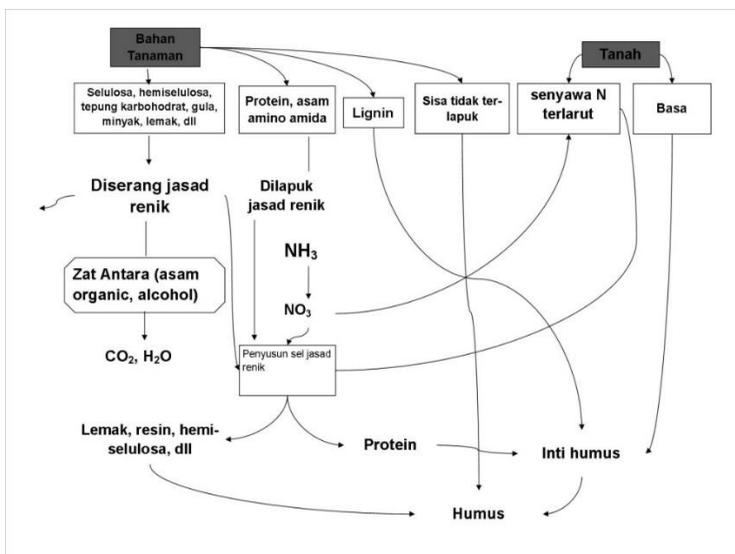
### 5.1 Faktor – faktor Penentu Kesuburan Tanah

Faktor penentu kesuburan tanah terdiri atas faktor pendukung dan faktor penghambat. Faktor pendukung adalah faktor yang memberikan kesuburan tanah, seperti asupan bahan organik, pupuk, sifat tanah, iklim, dan bahan induk. Faktor penghambat adalah faktor yang menyebabkan kesuburan tanah menjadi rendah, seperti pelindian dan pencucian unsur hara, keracunan dan kahat unsur hara, hasil panen, sifat tanah, dan bahan induk. Kita bicarakan satu demi satu faktor pendukung dan faktor penghambat di bawah ini.

Asupan bahan organik ke dalam tanah menambah kesuburan, unsur hara, dan memperbaiki struktur tanah. Bahan organik mempunyai kemampuan menahan unsur hara dan air tanah sehingga tanah terhindar dari kekeringan. Juga bahan organik sangat penting untuk tanah pasir, karena mampu memperbaiki struktur tanahnya. Bahan

organik memacu pertumbuhan jasad hidup tanah yang dapat menyediakan unsur hara bagi tanaman (van Scholl & Nieuwenhuis 2004). Asupan bahan organik berasal dari tanaman, hewan, dan kotoran manusia. Asupan bahan organik yang terbaik berasal sisa-sisa tanaman, kotoran hewan ternak, dan kotoran cacing tanah (*casting*). Kotoran manusia yang telah matang, menjadi lumpur tanah sangat baik menambah kesuburan tanah.

Bahan tanaman mengandung selulosa, hemiselulosa, tepung, gula, minyak, lemak (kelompok satu), protein, asam amino, dan amida (kelompok 2), lignin (kelompok 3), dan sisa tanaman yang tidak terdekomposisi (kelompok 4). Bahan kelompok 1 diserang oleh jasad renik tanah menghasilkan senyawa antara (asam organik dan alkohol) dan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Jasad renik tanah memanfaatkan bahan organik untuk energi dan sintesis tubuh jasad renik tanah. Bila jasad renik tanah mati meninggalkan lemak, lilin, hemiselulosa, dan protein. Senyawa ini bersama-sama dengan lignin membentuk humus tanah. Humus adalah perpaduan antara lignin dan senyawa lemak, lilin, hemiselulosa dan bahan tak terdekomposisi. Inti humus adalah cikal bakal humus adalah perpaduan antara protein, lignin, dan basa. Humus adalah senyawa yang dibentuk dari selulosa, protein, lignin, nitrogen, dan basa. Secara skematis pembentukan humus disajikan dalam Gambar 20 (Foth 1984).



Gambar 20. Struktur humus tanah (Sumber: Foth 1984)

Pupuk kompos dan pupuk pabrik dapat pula menambah kesuburan tanah. Keuntungan pupuk kompos adalah ramah lingkungan. Usaha tanaman organik banyak menggunakan pupuk kompos. Tanaman organik yang dihasilkan bebas dari pencemaran logam berat dan pestisida. Pupuk pabrik seperti urea, TSP, SP<sub>36</sub>, dan KCl masih digunakan perkebunan untuk menambah kesuburan tanah dan tanaman. Takaran pupuk pabrik perlu disesuaikan dengan kebutuhan tanaman dan sifat tanah tempat tanaman dibudidayakan. Kompos meningkatkan kadar bahan organik tanah (baca: humus tanah), karena berpengaruh positif terhadap jasad hidup

tanah, struktur tanah, infiltrasi, daya pegang air, stabilitas agregat tanah, dan kaya unsur hara bagi tanaman (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Keuntungan penggunaan kompos sebagai berikut: Mampu mematikan penyebab hama dan penyakit, dan biji gulma, karena temperatur kompos yang tinggi sehingga mereka tidak dapat bertahan hidup. Biasanya tikus dan tikus kecil yang bersarang di tumpukan tebal dedaunan tidak dijumpai pada kompos. Bila pupuk hijau dibajak ke dalam tanah dengan musim hujan yang lebat dapat tercucinya N atau terjadi denitrifikasi N, tetapi dengan kompos tidak akan terjadi. Bahan organik yang nisbah C/N tinggi dapat diturunkan dengan kompos. Dengan kompos, unsur hara dan bahan organik diawetkan (*preserved*) dan berpengaruh positif dalam waktu lama (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Kerugian kompos sebagai berikut: Pembuatan kompos membutuhkan banyak tenaga kerja. Bila tenaga kerja terbatas, dapat menjadi faktor penghambat. Di lain pihak, kompos adalah pupuk yang sangat berharga, sehingga biaya investasi tenaga kerja dapat lebih efisien. Kompos dibuat dalam waktu tertentu pada waktu pekerjaan yang lain tidak ada. Sumber bahan organik yang langka menjadi pembatas atau bersaing penggunaannya dengan bahan bakar rumah tangga atau industri. Hal ini dapat

ditanggulangi dengan menanam pohon untuk kayu bakar (van Scholl & Nieuwenhuis 2004).

Sifat tanah yang baik, tanah berstruktur remah, gembur, mengandung kadar lengas cukup, pH netral, kejenuhan basa, KPK dan bahan organik tanah yang tinggi, jasad hidup tanah yang bermanfaat melimpah, tetapi kurang mengandung aluminium, besi, dan mangan yang beracun bagi tanaman. Tanah yang mempunyai sifat-sifat seperti ini dikatakan tanah yang subur dan sehat.

Struktur tanah remah (*crumb*) menunjukkan bahwa tanah mempunyai pori-pori makro dan mikro yang seimbang, sama banyaknya. Pori-pori tanah terisi udara, air, dan unsur hara. Larutan tanah berisi campuran air, unsur hara yang tersimpan di dalam pori tanah. Struktur tanah remah terbentuk dari klei, bahan organik, bahan kapur, dan jasad hidup tanah. Miselia jamur sangat efektif membangun struktur tanah remah. Juga bahan organik bersama dengan klei, dan kapur membangun struktur tanah yang remah. Struktur tanah remah memungkinkan akar tanaman berkembang dan distribusi akar lebih baik di dalam tanah.

Tanah yang gembur merupakan tanah yang mudah diolah dengan menggunakan cangkul atau alat lain yang sejenis. Tanah yang gembur mencirikan tanah tersebut mempunyai kadar lengas yang cukup, bahan organik tanah yang memadai, dan lalu lintas

udara di pori-pori tanah sangat lancar. Tanah yang gembur memungkinkan akar tanaman dapat berkembang dengan cepat. Pada musim kemarau tanah yang gembur masih dapat mempertahankan kadar lengasnya untuk kehidupan tanaman dan jasad hidup tanah. Pada musim hujan tanah yang gembur masih dapat meloloskan kelebihan air ketika hujan datang dan terhindar dari penggenangan.

Kadar lengas tanah adalah volume air yang terdapat di pori-pori tanah (makro dan mikro) yang berfungsi sebagai pelarut unsur hara (pupuk) di dalam tanah. Kadar lengas dalam pori mikro tanah mencerminkan kadar lengas kapasitas lapang, dan kadar lengas dalam pori makro mencerminkan kadar lengas tanah yang siap didrainase. Macam kadar lengas tanah sebagai berikut: Kadar lengas tanah batas cair, kadar lengas tanah batas lekat, dan kadar lengas tanah batas titik layu permanen. Definisi batas cair, batas lekat, batas titik layu permanen diterangkan oleh Atterberg dalam penetapan konsistensi tanah (Kohnke 1968). Sekilas diterangkan bahwa kadar lengas batas cair bila tanah dicampur dengan air sampai dengan rata, diletakan pada cawan Atterberg, dibelah bagian tengah membentuk alur memisahkan dua bagian belahan tanah, kemudian cawan diketuk 25 x dan terjadi pertautan antara dua bagian belahan tanah, kemudian diambil contoh tanahnya dan ditetapkan kadar lengasnya secara gravimetri di laboratorium,

kadar lengas tanah yang diperoleh adalah kadar lengas batas cair. Sisa tanah di cawan itu diambil dan dibuat bulatan seperti bola kecil dan ditusuk dengan spatel aluminium, dilihat apakah tanah sudah melekat di spatel, bila sudah melekat, diambil contoh tanahnya dan ditetapkan kadar lengasnya dengan cara gravimetri, kadar lengas tanah yang diperoleh dikenal dengan kadar lengas batas lekat.

Sisa tanah dari cawan Atterberg diambil dan diletakan di atas permukaan papan persegi empat dengan tebal tanah setipis mungkin dan dianginkan di udara terbuka sampai terjadi perubahan warna dari gelap ke terang, contoh tanahnya diambil untuk ditetapkan kadar lengas batas titik layu permanen. Kadar lengas tersedia bagi tanaman adalah kadar lengas tanah yang terletak antara kadar lengas tanah batas cair dan kadar lengas tanah titik layu permanen.

Reaksi tanah (pH) mencerminkan suasana keasaman dan alkalinitas tanah. Bila tanah mempunyai  $\text{pH} < 7$  dikatakan bahwa tanah bersifat masam, dan bila  $\text{pH}$  tanah  $> 7$  disebut tanah alkalin atau salin. Tanah yang mempunyai  $\text{pH}$  7 merupakan tanah yang netral. Ketersediaan unsur hara tanah sangat bergantung pada besaran  $\text{pH}$  tanah. Tanah masam ( $\text{pH} < 7$ ) banyak mengandung aluminium, hidrogen, dan unsur mikro (Fe, Mn, Cu). Unsur mikro ini sangat beracun bagi tanaman bila konsentrasinya sangat tinggi. Tanah salin

(pH > 7) banyak mengandung unsur hara kalsium (Ca) dan magnesium (Mg). Unsur hara Ca dan Mg sangat diperlukan tanaman untuk kelangsungan hidupnya. Ketersediaan unsur hara yang optimum terletak pada tanah dengan pH 7.

Teknologi adaptasi tanaman sangat tepat untuk penggunaan tanah yang bermasalah seperti tanah masam atau tanah salin, karena biayanya murah dan hasilnya sangat memuaskan. Tanaman yang adaptif terhadap kemasaman atau salin sangatlah banyak dijumpai di alam. Adaptif berarti tanaman yang toleran (toleran dan setengah toleran), sedangkan tidak adaptif bila tanaman sangat peka atau tidak toleran terhadap kemasaman atau salin/garam. Contoh tanaman yang toleran kemasaman tanah (pH rendah) sebagai berikut: nenas, ubi kayu, tanaman graminea terutama padi dan tebu.

Beberapa tanaman kacang-kacangan seperti *Calopogonium*, *Centrosema*, *Desmodium*, *Psophocarpus*, *Pueraria*, dan *Stylosanthes* sp adalah tanaman yang sangat toleran kemasaman tanah (von Uexkull 1986). Contoh tanaman yang toleran tanah salin/garam sebagai berikut: tanaman kelapa sebagai wakil tanaman buah; beet, asparagus, dan spinach sebagai wakil tanaman sayur; rami, kapas, dan gula bit (Taylor & Ashcroft 1972).

Kejenuhan basa tanah (*soil bases saturation*) adalah jumlah kation basa dibandingkan dengan

jumlah Kapasitas Tukar Kation (KTK) tanah dinyatakan dalam persen. Semakin tinggi kejenuhan basa suatu tanah semakin baik sifat tanah itu terutama kesuburan dan kualitas tanahnya. Tanah yang berpelapukan telah lanjut seperti ultisol dan oksisol sangat kecil kejenuhan basanya, sedangkan tanah yang masih belum melapuk seperti andisol secara potensial kejenuhan basanya sangat tinggi. Ultisol dan oksisol merupakan tanah yang sangat miskin unsur hara (termasuk basa) dan bahan organik tanah yang rendah.

Ke duanya termasuk tanah yang marginal dengan produktivitas tanah yang rendah sehingga bercocok tanaman pada tanah ini membutuhkan pupuk yang relatif banyak. Andisol merupakan tanah berbahan induk abu vulkan atau gelas vulkan yang berasal dari abu gunung merapi. Andisol secara potensial sangat kaya unsur hara. Bila tanah ini melapuk akan melepaskan unsur hara ke dalam larutan tanah, dan tersedia bagi tanaman dalam jumlah yang cukup.

Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) tanah mencerminkan kemampuan tanah mengikat kation di permukaan koloid tanah. Kation yang diikat adalah aluminium (Al), hidrogen (H), ammonium ( $\text{NH}_4$ ), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sodium (Na). Partikel klei sangat berperanan besar dalam mengikat atau menukarkan kation. Klei dibagi dua, yang aktif dan tidak aktif. Klei aktif banyak

ditemukan pada tanah bertipe mineral klei 2:1 seperti montmorilonit, sedangkan klei tidak aktif pada tanah bertipe mineral klei 1:1 seperti kaolinit. Mineral klei kaolinit dijumpai pada ultisol sedangkan mineral montmorilonit pada vertisol.

Bahan organik tanah dikenal dengan humus tanah, berasal dari sisa-sisa jaringan tanaman yang melapuk dan tidak melapuk terdiri atas selulosa, protein, lignin, dan bahan tidak melapuk. Pembahasan bahan organik tanah telah dibahas pada bab sebelumnya dengan rinci sehingga disini tidak perlu lagi dibahas secara rinci. Peranan bahan organik tanah (baca: humus tanah) mampu meningkatkan kesuburan tanah dan kualitas tanah, memberikan pertumbuhan dan hasil tanaman yang cukup memadai. Tanah yang kaya bahan organik tanah banyak dijumpai jasad hidup tanah dan tahan terhadap erosi tanah.

Jasad hidup tanah mencerminkan keanekaragaman populasi hayati di dalam tanah seperti jasad hidup makro, meso, dan mikro. Contoh jasad hidup makro seperti hewan mamalia, tikus, ular dan lain-lain. Contoh jasad hidup meso seperti cacing tanah, rayap, kumbang, dan lain-lain. Contoh jasad hidup mikro seperti bakteri, jamur, cendawan, dan lain-lain. Jasad hidup tanah membuat rantai makanan dikenal dengan *soil food chain*. Rantai makanan dalam tanah sangat penting untuk kelangsungan hidup hewan-hewan di dalam tanah.

Temperatur dan curah hujan merupakan anasir iklim yang sangat mendukung kesuburan tanah. Temperatur dan curah hujan mampu melapukan bahan induk tanah (organik dan anorganik) kemudian melepaskan unsur hara ke dalam tanah dan unsur hara ini menambah kesuburan tanah. Peningkatan satu derajat temperatur memberikan kenaikan reaksi kimia pelapukan bahan induk 2 kali lipat. Semakin tinggi temperatur dan didukung curah hujan yang tinggi, pelapukan bahan induk semakin cepat dan cepat pula melepaskan unsur hara ke dalam tanah, dan tanah menjadi lebih subur.

Bahan induk tanah basalt melapuk dengan perantaraan temperatur yang tinggi dan curah hujan yang terus menerus sehingga dilepaskannya unsur hara Ca, Mg, K, dan Na ke dalam tanah. Basalt merupakan batuan induk yang bersifat basa (kaya kation Ca, Mg, K, dan Na). Bahan induk tanah granit sangat tahan terhadap pelapukan dan tanah miskin unsur hara, biasanya dikenal dengan batuan bersifat asam.

Pelindian dan pencucian adalah faktor penghambat kesuburan tanah. Pelindian (*leaching*) dan pencucian (*washing*) adalah dua istilah yang sering kali tumpang tindih penggunaannya. Pelindian adalah proses (unsur hara) tanah yang dibawa air hujan dari permukaan tanah ke lapisan tanah bawah (*subsoil*) sehingga tidak terjangkau oleh akar tanaman.

Pencucian adalah proses (unsur hara) tanah yang dibawa air hujan yang arahnya tidak diketahui, vertikal maupun horizontal sampai ke laut, sungai, atau danau. Pelindian dan pencucian unsur hara dalam tanah yang terjadi menyebabkan tanah kahat unsur hara tertentu (Ca, Mg, K, Na), tetapi tetap meninggalkan unsur Al, Fe, dan Mn yang tinggi. Tanah mengandung unsur Al, Fe, dan Mn yang tinggi, tetapi mengandung unsur Ca, Mg, K, dan Na yang rendah. Tanah seperti ini sangat tidak subur, karena mempunyai kadar Al, Fe, Mn yang beracun dan kahat unsur hara. Kadar Al, Fe, dan Mn yang tinggi menyebabkan tanah bersifat masam dengan pH yang sangat rendah ( $\text{pH} < 5,5$ ).

Keracunan dan kahat unsur hara juga merupakan faktor penghambat kesuburan tanah. Hasil panen yang terus menerus diambil dapat menyebabkan kesuburan tanah rendah, karena sebagian besar unsur hara terangkut melalui hasil panen. Demikian pula, unsur hara beracun yang tertinggal di dalam tanah seperti Fe, dan Mn juga menghambat pertumbuhan tanaman dan kesuburan tanah juga rendah.

Sifat dan bahan induk tanah adalah dua faktor penghambat kesuburan tanah. Sifat tanah yang buruk disebabkan bahan induk tanah yang buruk. Contohnya, pH tanah yang rendah atau tanah bersifat masam, karena bahan induk tanah yang masam.

Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) yang rendah, karena bahan induk tanah yang dominan mengandung mineral klei tipe 1:1 yang sangat rendah KPK nya seperti kaolinit, gothit, dan hematit.



## VI. Evaluasi Kesuburan Tanah

Evaluasi atau penilaian, kadang-kadang juga termasuk istilah monitoring kesuburan tanah merupakan upaya yang sangat penting, karena dapat menghemat biaya produksi (pupuk, pestisida, dan benih), dan merekomendasikan pupuk. Rekomendasi pupuk merupakan tahap akhir suatu evaluasi kesuburan tanah. Evaluasi kesuburan tanah dapat melalui tahapan sebagai berikut: Pengamatan visual tanaman, analisis tanah, dan uji tanaman, dan percobaan biologi.

Pengamatan visual tanaman dilakukan untuk mengetahui gejala atau tanda yang melekat pada diri tanaman sehingga tanaman tidak mampu melangsungkan siklus hidupnya sampai dengan produksi. Gejala visual tanaman yang tampak biasanya tidak akurat, karena gejala yang timbul boleh jadi bukan karena kahat atau keracunan unsur hara, tetapi karena serangan hama dan penyakit. Evaluasi kesuburan tanah dengan melihat gejala visual tanaman dilakukan untuk mendapatkan gambaran kasar keadaan pertumbuhan dan perkembangan tanaman,

kahat atau keracunan unsur hara. Beberapa gejala atau ciri yang umum ditemukan pada tanaman yang kahat atau keracunan unsur hara adalah perubahan warna daun dari hijau menjadi kuning, coklat, atau kombinasinya. Perubahan warna daun ini disebut dengan gejala *chlorosis*. Gejala yang lain seperti terdapat bercak-bercak daun, biasanya disebut dengan gejala *nodes*. Bercak-bercak daun menampakkan gejala daun berlubang, atau berbintik hitam atau coklat. Gejala lain seperti pertumbuhan dan perkembangan tanaman tidak normal (*deformation*), seperti akar yang pendek, tebal, berlendir, dan menggulung; pucuk daun melipat atau menguncup, buah yang kurang sempurna, biasanya buahnya kecil-kecil, bintik-bintik hitam, dan tidak bundar. Gejala-gejala kahat atau keracunan unsur hara telah disajikan pada bab sebelumnya.

Analisis tanah memberikan gambaran status unsur hara dalam tanah (sangat rendah, rendah, cukup, tinggi, dan sangat tinggi), identifikasi kahat/keracunan unsur hara, menentukan kadar kritis unsur hara, dan membuat rekomendasi pupuk (Riwandi 2007). Metode analisis tanah secara singkat dikelompokkan menjadi 3 bagian, yaitu pengambilan cuplikan/contoh tanah, ekstraksi dengan bahan kimia, dan pengukuran kadar unsur hara (Riwandi 2007). Marilah kita bahas satu per satu di bawah ini.

Status unsur hara dalam tanah sangat penting diketahui, karena menunjukkan kemampuan tanah untuk menyediakan unsur hara di dalam tanah. Unsur hara dalam tanah mempunyai status tersedia (*available*) dan tidak tersedia (*unavailable*). Unsur hara yang tidak tersedia biasanya berada pada mineral klei tanah sebagai unsur hara yang terjerap oleh mineral klei tanah, atau bahan organik tanah. Unsur hara tidak tersedia merupakan cadangan unsur hara dalam tanah. Unsur hara tersedia adalah unsur hara yang siap diambil (*uptake*) akar tanaman, biasanya berada dalam larutan tanah (*soil solution*) dan pada permukaan koloid tanah. Status unsur hara tersedia sangat erat kaitannya dengan unsur hara dalam tanaman. Unsur hara tanaman sangat bergantung pada unsur hara tersedia dalam tanah. Biasanya unsur hara tersedia berkurang ketika tanaman dipanen dan hasil panen diangkut keluar dari ladang/sawah, karena sebagian unsur hara terangkut melalui panen tanaman. Unsur hara tidak tersedia yang terdapat dalam tanah segera mengisi kekurangan unsur hara yang diangkut lewat panen, tetapi cara ini sangat lama.

Identifikasi kahat/keracunan unsur hara tanah dilakukan dengan analisis cuplikan tanah di laboratorium. Hasil analisis tanah dicocokkan dengan indeks analisis tanah (Balittanah 2005). Indeks analisis tanah setiap unsur hara tanah digolongkan ke dalam kategori rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi.

Respon tanaman terhadap indeks analisis tanah beragam bergantung pada macam unsur haranya. Salah satu contoh, hubungan antara indeks analisis tanah dan respon tanaman disajikan dalam Tabel 5 (Hodges 2011). Tanaman akan memberikan respon terhadap pemupukan bila indeks analisis tanah kategori rendah (kahat) atau sedang. Pemupukan efektif dilakukan pada tanah yang mempunyai indeks analisis tanah atau indeks kesuburan tanah yang rendah atau sedang, sedangkan yang tinggi dan sangat tinggi (keracunan), tidak perlu dipupuk.

Kadar kritis unsur hara diperoleh ketika status unsur hara tanah dikorelasikan dengan kadar unsur hara tanaman. Kadar kritis unsur hara didefinisikan sebagai konsentrasi unsur hara yang menghasilkan kecepatan tumbuh, produksi atau kualitas tanaman secara nyata mulai menurun (kurang dari 90% berat relatif tanaman).

Tabel 5. Hubungan antara indeks analisis tanah dan tanggap tanaman

Indeks Analisis Tanah		Tanggap Tanaman Terhadap Penggunaan Unsur Hara				
Kisaran	Kategori	P	K	Mn	Zn	Cu
0-25	Rendah	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
26-50	Sedang	Rendah	Rendah	Nol	Nol	Nol
51-100	Tinggi	Nol	Nol	Nol	Nol	Nol
> 100	> Tinggi	Nol	Nol	Nol	Nol	Nol

Rekomendasi pupuk berdasarkan analisis tanah seringkali dilakukan, tetapi hasilnya kurang tepat, karena pertumbuhan dan hasil tanaman tidak

hanya ditentukan oleh unsur hara tanah, tetapi faktor lain seperti iklim, air, varietas tanaman, dan pupuk.

Pencuplikan tanah atau pengambilan cuplikan tanah yang benar bila memenuhi syarat sebagai berikut: Cuplikan tanah benar-benar mewakili bentanglahan (*landscape*), cuplikan dan sub-cuplikan tanah tidak mengalami perubahan sebelum analisis tanah dikerjakan, sub-cuplikan tanah harus mewakili cuplikan tanah yang diambil, dan hasil analisis tanah dapat menunjukkan sifat-sifat tanah yang sesuai dengan keadaan tanahnya (Riwandi 2007). Metode pengambilan cuplikan tanah adalah metode acak sederhana, acak strata, sistimatik, dan komposit (Riwandi 2007). Metode sub-cuplikan tanah dikenal dengan metode kuadran. Metode kuadran terdiri atas kuadran 1 s.d 4. Sebagai gambaran, cuplikan tanah diambil dan ditiriskan dengan corong di atas lembaran kertas kuadran. Dua kuadran yang berlawanan letaknya berisi cuplikan tanah dikumpulkan dan ditiriskan kembali di atas lembaran kertas kuadran. Demikian seterusnya diulangi sampai dengan 3 x. Sub-cuplikan tanah yang ke tiga diambil dan disiapkan untuk analisis tanah. Sebelum tanah dianalisis di laboratorium, disiapkan terlebih dahulu cuplikan tanah/sub-cuplikan tanah sebagai berikut: Cuplikan tanah dikering-anginkan, ditumbuk, diayak dengan saringan mata saring 2 mm atau 0,5 mm. Sub-cuplikan tanah diperoleh dengan metode kuadran. Metode

kuadran ialah cara memperoleh cuplikan tanah yang representatif dengan membuat 4 bagian di atas kertas kalkir yang diberi tanda kuadran 1, 2, 3, dan 4. Selanjutnya cuplikan tanah ditiriskan di atas kuadran yang telah dibuat dengan menggunakan corong dari kertas kalkir. Cuplikan tanah yang berada di atas kuadran yang berlawanan, misalnya kuadran 1 dan 3 atau kuadran 2 dan 4 diambil dan dicampurkan dengan rata. Ulangi pekerjaan ini 2 sampai dengan 3 kali sehingga diperoleh cuplikan tanah yang representatif/mewakili tanah yang sesungguhnya di lapangan.

Ekstraksi tanah dilakukan dengan menggunakan senyawa kimia disebut pengekstrak. Umumnya bahan pengekstrak yang digunakan untuk analisis kation basa (Ca, Mg, K, Na) dan KPK tanah adalah ammonium asetat 1 N pH 7.

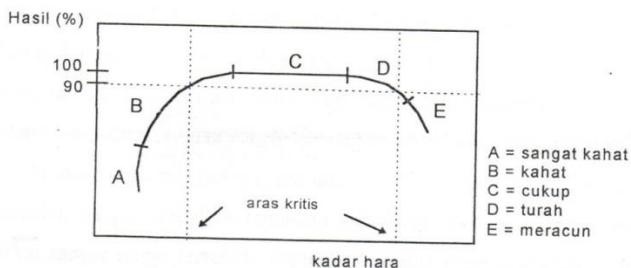
Pengukuran kadar unsur hara (kation/anion) dapat dilakukan dengan titrimetri, spektrofotometer, dan *atomic absorption spectrophotometer* (AAS). Hasil pengukuran kadar kation/anion dinyatakan dalam %, ppm, me/100 g, atau cmol(+)/kg.

Uji contoh tanaman adalah cara yang langsung menunjukkan status unsur hara, identifikasi kahat/keracunan, sinergisme/ antagonisme unsur hara, dan kadar kritis unsur hara tanaman (Riwandi 2007). Hubungan antara konsentrasi unsur hara dengan hasil tanaman dinyatakan dalam Gambar 21

(Rosmarkam 2001). Gambar 21 menunjukkan bahwa grafik pertumbuhan tanaman berupa kurva sigmoid, yang terdiri atas 5 bagian, yaitu bagian kahat unsur hara, bagian rendah, bagian cukup, bagian tinggi, dan bagian berlimpah unsur hara. Bagian kahat unsur hara mencerminkan kekurangan unsur hara tanaman, status unsur hara sangat rendah, dan hasil tanaman rendah. Bagian rendah unsur hara mencerminkan pertumbuhan tanaman normal, tetapi hasil tanaman di bawah normal. Bagian cukup unsur hara mencerminkan pertumbuhan tanaman normal, tidak ditemui gejala kahat unsur hara. Bagian tinggi unsur hara mencerminkan pertumbuhan tanaman sangat baik. Bagian berlimpah unsur hara mencerminkan pertumbuhan dan hasil tanaman mulai menurun dan keracunan unsur hara.

Bila suatu tanaman mempunyai status unsur hara yang sangat rendah, maka pemupukan penting dilakukan dan respon tanaman terhadap pupuk yang diberikan sangat positif, artinya pupuk yang diberikan memberikan pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan lebih cepat daripada tanpa pemupukan. Beda halnya, bila tanaman telah cukup unsur haranya, pemupukan yang dilakukan hanya untuk memelihara ketersediaan unsur hara dalam tanah. Bila tanaman telah mempunyai unsur hara sangat tinggi, pemupukan yang dilakukan tidak berarti, karena respon tanaman terhadap pupuk yang

diberikan sangat kecil, atau bahkan tidak sama sekali. Hubungan antara pertumbuhan tanaman dan pupuk digambarkan oleh suatu kurva pertumbuhan disebut kurva S, singkatan dari *Sigmoid*. Kurva S menggambarkan pertumbuhan tanaman berbanding lurus dengan pupuk yang diberikan, pertumbuhan tanaman masih terus berlangsung dengan pemupukan, sampai dengan pertumbuhan tanaman mengalami penurunan, dan akhirnya dengan bertambah pupuk, pertumbuhan tanaman tidak lagi meningkat, bahkan mengalami keracunan unsur hara. Titik belok pertumbuhan tanaman yang menurun dengan bertambah pupuk disebut titik maksimum tanaman, atau titik kritis unsur hara atau pupuk yang diberikan. Titik kritis unsur hara disebut pula titik optimum unsur hara atau pupuk. Gambar 21 menunjukkan kurva pertumbuhan tanaman (Rosmarkam 2001).



Gambar 21. Hubungan antara konsentrasi unsur hara tanah dan hasil tanaman (Rosmarkam 2001)

Percobaan biologi adalah percobaan dengan menggunakan tanaman indikator yang menguji apakah terdapat respon tanaman terhadap pupuk yang diberikan (diperoleh dari analisis tanah dan/atau uji tanaman)? Bila ada respon tanaman terhadap pupuk, berapa jumlah pupuk yang memberikan hasil tanaman tertinggi atau terbaik? Biasanya dinyatakan hasil tanaman dalam ton/ha atau kg/ha.

Rekomendasi pemupukan dibuat atas dasar percobaan biologi. Prinsipnya, rekomendasi pupuk yang diberikan dapat lebih dari 1, 2, 3, atau 4, dan seterusnya. Produksi pertanian yang diinginkan merupakan kunci rekomendasi pupuk yang diberikan. Semakin tinggi produksi pertanian yang diinginkan semakin besar jumlah pupuk yang diberikan ke dalam tanah. Batasannya adalah produksi pertanian yang maksimum dengan pupuk yang optimum (titik kritis pupuk).



## VII. Konsep Pemupukan

### 7.1 Pengertian

Pupuk ialah bahan yang digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman, berasal dari bahan anorganik dan/atau bahan organik. Kadang-kadang pupuk dapat memperbaiki kesuburan tanah, dan lingkungan sehingga dapat disebut dengan bahan pembenah tanah (*soil amendement* atau *soil conditioner*) yang ramah lingkungan. Pemupukan ialah metode atau cara memupuk menurut aturan yang benar, ilmiah, dan efisien, biasanya dengan cara sebar, pita, *side dressing* seperti dibenam atau mengelilingi batang tanaman, dan dicampur dengan benih. Pupuk tunggal ialah jenis pupuk yang mengandung satu unsur hara atau kadang-kadang lebih dari satu unsur hara, berupa senyawa, dan/bahan berasal dari pabrik dan alam. Misalnya, pupuk urea mengandung unsur hara N, pupuk kompos mengandung unsur hara N, P, dan S. Pupuk majemuk ialah jenis pupuk yang dibuat dengan mencampur beberapa pupuk tunggal menjadi satu jenis pupuk. Misalnya, pupuk majemuk N, P, K

yang dibuat dari campuran pupuk N, pupuk P, dan pupuk K dengan perbandingan tertentu (misalnya 15:15:15). Pupuk anorganik ialah jenis pupuk yang bahan dasarnya dari bahan anorganik, dibuat di pabrik atau dibuat dengan bahan pupuk berasal dari alam yang diproses di pabrik. Pupuk organik ialah jenis pupuk yang bahan dasarnya dari bahan organik berasal dari sisa-sisa tanaman, kotoran hewan, dan/atau manusia, dikenal pula dengan pupuk kompos/pupuk hayati. Unsur hara esensial ialah unsur hara yang utama dibutuhkan tanaman. Unsur hara beneficial ialah unsur hara yang bermanfaat bagi tanaman tertentu. Misalnya, Si dibutuhkan untuk tanaman padi, Cl dibutuhkan untuk tanaman tembakau, dan tanaman palm (kelapa, kelapa sawit, dan pinang).

Ruang lingkup yang dipelajari dalam bab pemupukan terdiri atas:

1. Aspek unsur hara esensial dan beneficial
2. Aspek interaksi antara tanah dengan tanaman
3. Aspek fisik, kimia, dan biologi tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara
4. Aspek defisiensi/keracunan unsur hara termasuk batas kritis unsur hara
5. Aspek pupuk makro dan mikro
6. Aspek pemupukan, cara sebar, pita, *side dressing*, semprot lewat daun (*foliar application*)

7. Aspek pengelolaan tanah yang bermasalah, tanah bergaram, tanah masam, dan tanah pasca tambang.

Tujuan mempelajari bab pemupukan sebagai berikut:

1. Untuk mengkaji sifat, watak, dan ciri tanah yang berhubungan dengan ketersediaan unsur hara bagi tanaman
2. Untuk mengkaji unsur hara esensial, beneficial, dan mekanisme ketersediaan unsur hara dalam tanah
3. Untuk mengkaji jenis, takaran, cara, dan waktu pupuk
4. Untuk mengkaji pengelolaan tanah yang bermasalah, tanah bergaram, tanah masam, dan tanah pasca tambang.

Manfaat mempelajari pemupukan sebagai berikut:

1. Mahasiswa mampu menganalisis tanah yang bermasalah, defisiensi dan/ keracunan unsur hara di laboratorium dan di lapangan
2. Mahasiswa mampu cara meningkatkan produksi pertanian dengan pemupukan
3. Mahasiswa mampu memberikan rekomendasi pupuk kepada petani dan/stakeholder.

## **7.2 Unsur Hara Esensial**

Kita mengetahui ada 16 macam unsur hara esensial, yaitu:

C (karbon), H (hidrogen), O (Oksigen), N (nitrogen), P (fosfor), K (kalium), Ca (kalsium), Mg (magnesium), S (belerang), Fe (besi), Mn (mangan), Cu (tembaga), Zn (seng), Mo (molibdenum), B (boron), dan Cl (klor). Delapan unsur hara yang pertama disebut unsur hara makro, sisanya disebut unsur hara mikro. Unsur hara makro dinyatakan dalam satuan persen (%) dari berat biomassa atau pupuk, dan unsur hara mikro dinyatakan dalam satuan *part per million* (ppm).

Para ahli nutrisi/gizi tanaman dan ilmu tanah tidak begitu ketat menggunakan definisi esensialitas unsur hara, sebab mereka memasukkan 4 unsur hara lain yang juga penting untuk pertumbuhan tanaman tertentu ke dalam 16 unsur hara esensial. Unsur hara itu adalah Na (natrium), Si (silika), Co (cobalt), dan Va (vanadium). Unsur Na bermanfaat dan esensial bagi tanaman  $C_4$  fotosintesis, *chenopodiaceae* dan spesies tanaman lain yang adaptif tanah bergaram yang kaya Na. Tanaman yang optimum pertumbuhannya pada tanah bergaram yang kaya Na, seperti *celery*, *spinach*, *sugar beet*, dan *turnip*. Unsur hara Si berguna dan esensial bagi tanaman padi, juga Si dapat memperbaiki pertumbuhan tebu. Cobalt berguna dan esensial bagi jasad renik penambat N dari atmosfer, seperti rhizobia, bakteri penambat N bebas, dan *blue-green algae*. Vanadium berguna dan esensial bagi beberapa jasad renik.

### 7.3 Peranan dan Gejala Kahat Unsur Hara Esensial

Unsur hara nitrogen (N) berperan sebagai sintesis asam amino, protein, khlorofil, asam nukleat, dan koensim. Tanaman yang kahat unsur hara N menunjukkan gejala warna daun kurang hijau, daun tua warna kuning, dan mati. Fosfor (P) berperan sebagai proses transfer metabolit, Adenosine Tri Phosphate (ATP), Adenosine Di Phosphate (ADP), fotosintesis, respirasi, dan bagian dari fosfolipid. Tanaman yang kahat P menunjukkan gejala tepi daun keunguan atau merah keunguan. Kalium (K) berperan dalam pembentukan gula, tepung, metabolisme lipid, penambatan N, dan netralisasi asam organik. Tanaman yang kahat K menunjukkan gejala tepi daun terbakar, dan daun menggulung. Kalsium (Ca) berperan bagian dari dinding sel, pertumbuhan sel, divisi sel, dan kofaktor ensim. Tanaman yang kahat unsur Ca menunjukkan gejala pucuk daun mati, dan bintik hitam di tengah tulang daun. Magnesium (Mg) berperan dalam bagian dari khlorofil, dan sintesis makanan tanaman. Tanaman yang kahat Mg menunjukkan gejala mirip gejala kahat N. Peranan unsur hara mikro seng (Zn) adalah pembentukan auxin, khloroplast, metabolisme karbohidrat, dan menstabilkan membran protein. Tanaman yang kahat Zn menunjukkan gejala kerdil, daun muda memutih, dan gejala *khaira* (becak karat )

pada padi. Mangan (Mn) berperan sebagai fotosintesis, evolusi oksigen, redoks, dekarboksilasi dan hidrolisis. Tanaman yang kahat Mn menunjukkan gejala hilangnya warna daun--tulang daun hijau, daun pucat atau daun putih. Besi (Fe) berperan bagian dari sitokrom, leghemoglobin, redoks, respirasi, dan fotosintesis tanaman. Tanaman yang kahat Fe menunjukkan gejala daun muda kuning-putih. Tembaga (Cu) berperan sebagai bagian dari khlorofil, katalis respirasi, karbohidrat, dan protein. Tanaman yang kahat Cu menunjukkan gejala kerdil, tunas daun ujung mati, putih, sempit, dan terpilin. Boron (Bo) berperan dalam perkecambahan, pertumbuhan tabung serbuk sari, pembuahan, dan pembelahan sel tanaman. Tanaman yang kahat Bo menunjukkan gejala tunas mati, roset, bunga, dan buah kecil. Molibdenum (Mo) berperan sebagai bagian dari enzim nitrat reduktase, nitrogenase, dan penambat N legum (kacang-kacangan). Gejala tanaman kahat Mo adalah *whiptail* pada kubis, yang gejalanya sama dengan N. Khlor (Cl) berperan dalam evolusi oksigen pada fotosistem II, dan meningkatkan tekanan osmotik sel. Gejala kahat Cl pada tanaman tampak khlorotik, dan nekrotik pada daun tanaman.

## 7.4 Pupuk Kompos dari Limbah Karet

Tujuan pemupukan tanaman karet untuk menghasilkan mutu getah karet dan produksi latek yang tinggi. Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan penelitian peningkatan mutu getah karet dengan memanfaatkan pupuk organik lokal (POL) yang berasal dari limbah karet (kolam pengendapan pertama). Pertama kali dilakukan tinjauan lokasi limbah karet di PTPN 7 Padang Plawi Bengkulu (Gambar 22).

Limbah karet padat berumur 4 tahun berada di lokasi penimbunan dekat pabrik pengolahan karet. Cuplikan limbah karet diambil untuk dianalisis kadar unsur haranya di laboratorium. Hasil analisis laboratorium disajikan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Hasil analisis laboratorium sampel limbah karet dari pabrik pengolahan limbah karet di PT Perkebunan Nusantara VII Padang Plawi, Bengkulu, Indonesia

Cuplikan limbah karet	pH (H <sub>2</sub> O)	C organik (%)	N total (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> tersedia (ppm)	K-tertukar cmol(+) $\text{kg}^{-1}$
Cuplikan 1	6,6	14,65	0,50	0,81	0,24
Cuplikan 2	6,4	15,03	0,50	0,79	0,24

Sumber: Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Unib (2016)

Limbah karet diambil dan diangkut dengan menggunakan kendaraan roda 4 dari lokasi penimbunan limbah karet PT Perkebunan Nusantara VII Padang Plawi, Bengkulu ke Lahan Percobaan Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu di desa Medan Baru Pematang Gubernur, Bengkulu. Pengangkutan limbah karet disajikan dalam Gambar 23.



Gambar 22. Timbunan limbah karet dari pabrik pengolahan karet milik PT Perkebunan Nusantara VII Padang Plawi, Bengkulu (Foto: Riwandi 2016)



Gambar 23. Pengambilan limbah karet (Foto: Riwandi 2016)

Limbah karet difermentasi di dalam bak pengomposan dengan menggunakan metode indore. Metode indore artinya lubang tempat fermentasi bahan kompos/limbah karet berukuran 2 m (lebar) x 5 m (panjang) x 1 m (kedalaman lubang tanah). Seluruh bahan kompos dimasukkan ke dalam bak kompos disiram dengan air bersih sampai basah dan diberi lubang ventilasi dari pipa PVC yang dilubangi tiap 10 cm panjang pipa. Pipa PVC tersebut ditancapkan ke dalam bahan kompos di dalam bak kompos. Permukaan kompos ditutup dengan daun pisang serapat-rapatnya atau dengan terpal plastik. Bak kompos disajikan dalam Gambar 24.

Fermentasi limbah karet membutuhkan waktu 1,5 bulan sampai dengan pupuk kompos limbah karet dinyatakan masak. Pupuk kompos dikatakan masak

bila warnanya hitam kecoklatan, tidak berbau, pH 7, kadar air sedang, dan temperatur mendekati temperatur udara (30°C). Cara yang sederhana untuk mengetahui pupuk kompos masak dengan perasan tangan. Segumpal pupuk kompos diambil dengan tangan, digenggam dan diperas, bila biomassa kompos yang keluar dari sela-sela jari kurang dari 1/3 dikatakan pupuk kompos masak. Setelah masak pupuk kompos dipanen dan diayak menggunakan saringan kawat untuk memperoleh pupuk kompos yang homogen, dan dipisahkan bila ada kotoran karet, batu, dan akar tanaman (Gambar 25). Pupuk kompos yang sudah diayak dimasukkan ke dalam karung plastik kapasitas 50 kg. Tiap karung kapasitas 50 kg berisi pupuk kompos diambil cuplikan pupuknya dan dikumpulkan di dalam kantong plastik kapasitas 5 kg sebagai cuplikan pupuk kompos (Gambar 26). Cuplikan pupuk kompos ini dibawa ke laboratorium untuk dianalisis kadar unsur haranya.



Gambar 24. Fermentasi limbah karet dengan metode indore  
(Foto: Riwandi 2016)



Gambar 25. Pengayakan pupuk kompos (Foto Riwandi  
2016)



Gambar 26. Pengambilan cuplikan pupuk kompos untuk dianalisis di laboratorium (Foto: Riwandi 2016)



## Referensi

- Awatt Project. 2009. Soil fertility management course. March1, 2009 – March 5, 2009. Afghanistan Water, Agriculture and Technology Transfer (AWATT) Project. 105 pages
- Balittanah, 2005. Petunjuk Analisis Tanah, Air, Pupuk, dan Tanaman. Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Bohlool, B. B., J.K. Ladha, D. P. Garrity, and T. George. 1992. Biological nitrogen fixation for sustainable agriculture: A perspective. *Plant and Soil* 141:1-11.
- Bohn, H. L., B. L. McNeal & G. A. O'Connor. 1979. Soil chemistry. A Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons. New York. 329 pages
- Brady & Weil, 2004. *Elements of the Nature and Properties of Soils*.
- Brady, N. c. 1990. *The Nature and Properties of Soils*. 10th Ed. Macmillan Publisher Company. New York. 620 pages

- Deenik, J. 2005. Basic concepts in soil fertility. Soil Fertility Workshop, February 23 & 24. College of Tropical Agriculture and Human Resources, Univ. of Hawaii, Manoa
- FAO. 1984. Fertilizer and plant nutrition guide. Fertilizer and Plant Nutrition Service, Land and Water Development Division. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 9. Rome.175 pages
- FAO. 2001. Soil fertility management in support of food security in sub-Saharan Africa. Rome. 55 pages.  
fixation: Investments, expectations and actual contributions
- Foth, H. D. 1984. Fundamentals of soil science 7<sup>th</sup> eds. John Wiley & Sons. New York. 435 pages.
- Foth, H. D. 1984. Fundamentals of Soil Science. 7<sup>th</sup> Ed. John Wiley & Sons. New York. 435 pages
- Gaskell, M., R. Smith, J. Mitchell, T. Koiko, C. Fouche, T. Hartz, and L. Jackson. 2012. Soil fertility management for organic crops. Univ. of California, Div. of Agric. and Natural Resources. <http://anrctalog.ucdavis.edu>.
- Gruhn,P., F. Goletti & M. Yudelman. 2000. Integrated nutrient management, soil fertility, and sustainable agriculture: Current issues and future challenges. International Food Policy

Research Institute 2033 K Street,  
N.W.Washington, D.C. 20006 U.S.A.

- Hakim, N., M. Y. Nyakpa, A .M.Lubis, S. G. Nugroho,  
R. Saul, M. A. Diha, G. B. Hong, dan H. H.  
Bailey. 1986. Dasar-dasar Ilmu Tanah. Penerbit  
Universitas Lampung. 488 halaman.
- Hodges, S. C. 2011. Soil fertility basics. NC Certified  
crop advisor training. Soil Sc. Extention North  
Carolina State University.
- Inckel, M., P. de Semet, T. Tersmette, T. Veldkamp.  
2005. Preparation and use of compost.  
Agrodok 8. Agromisa Foundation,  
Wageningen. 65 pages.
- Kebede, F. & C.Yamoah. 2009. Soil Fertility Status and  
Numass Fertilizer Recommendation of Typic  
Hapluusterts in the Northern Highlands of  
Ethiopia. World Applied Sciences Journal 6  
(11): 1473-1480
- Kohnke, H. 1968. Soil Physics. McGraw-Hill, New  
York. 224 pages.
- Mengel, K. & E. Kirby. 1987. Principles of plant  
nutrition. International Potash Inst. Bern  
Switzerland.687 pages.
- Munawar, A. 2011. Kesuburan tanah dan nutrisi  
tanaman. IPB Press. Bogor. 240 halaman
- Munson, R. D. 1982. Potassium, calcium, and  
magnesium in the tropics and subtropics.

- International Fertilizer Dev. Center. Muscle Shoals, Alabama 35660. 62 pages
- Nyakpa, M. Y.; A.M. Lubis; M. A. Pulung; A. G. Amrah; A. Munawar; G. B. Hong; N. Hakim 1988. Kesuburan tanah. Penerbit Universitas Lampung. 258 halaman
- Organic exchange. 2009. Soil fertility management. An introductory fact sheet for farmers and projects. [www.organicexchange.org](http://www.organicexchange.org)
- Peoples M B and Crasswell E T 1992 Biological nitrogen
- Prasad, R., Power, J.F. 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture. CRC Lewis Publ. New York. 356 p.
- Riwandi, 2007. Analisis Tanah, Air, dan Tanaman. Buku ajar. Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu.
- Riwandi, 2007. Kualitas Tanah. Bahan Ajar Program Studi Ilmu Tanah Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian UNIB.
- Rosmarkam, A. 2001. Ilmu kesuburan tanah. Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UGM, Yogyakarta. 209 halaman
- Russel, E. W. 1978. Soil conditions and plant growth 10<sup>th</sup> eds. Longman. London & Ner York.
- Taylor, S.A and G.L. Ashcroft. 1972. Physical edaphology. The physics of irrigated and

nonirigated soils. W.H. Freeman and Company. San Fransisco. Pages 533

Tisdale, L. & Nelson, W. L. 1975. Soil fertility and fertilizer. Macmillan Publ. Co Inc. New York and Collier Macmillan Publ. London

Tisdale, S. L; W. L. Nelson; J. B. Beaton. 1985. Soil fertility and fertilizer 4<sup>th</sup> eds. Macmillan Publ. Company New York, Collier Macmillan Publ. London. 754 pages

to agriculture. Plant and Soil 141, 13-39

van Scholl, L. & R. Nieuwenhuis. 2004. Soil fertility management 4<sup>th</sup> eds.. Agrodok 2. Agromisa Foundation, Wageningen. ISBN: 90-77073-03-5. 82 pages.

Vogt, R.D and H. M. Seip. 2017. Environmental chemistry II. KJM5700

Von Uexkull, H.R 1986. Efficient fertilizer use in acid upland soil of the humid tropics. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bull. 10. FAO United Nations, Rome. Pages 59.

<http://www.bettersoils.com.au/module2/images/27.gif>

## Profil Penulis



Prof. Dr. Ir. Riwandi, MS. dilahirkan di desa Sumanik, Batusangkar, Sumatera Barat pada tanggal 19 Agustus 1956. Sejak kecil penulis merantau ke Palembang, Sumatera Selatan dan menamatkan pendidikan di SD Muhammadiyah Balayudha Palembang tahun 1970, kemudian meneruskan ke SMP Negeri X Palembang, lulus pada tahun 1973. Pendidikan menengah atas ditamatkan tahun 1976 di SMA Negeri III Palembang. Pada tahun 1977, penulis meneruskan kuliah di Fakultas Pertanian UGM dan lulus dengan gelar insinyur bidang Ilmu Tanah tahun 1983. Setelah selesai pendidikan S1, penulis menimba pengalaman survei tanah P4S (Proyek Pengembangan Persawahan Pasang Surut) di Kalimantan Tengah bergabung dengan tim survei tanah Fakultas Pertanian UGM. Kemudian penulis mulai mengabdikan diri sebagai dosen di Fakultas Pertanian UNIB sejak bulan Maret 1984. Pada tahun yang sama, penulis mengikuti kursus pengembangan metode analisis tanah, air, dan tanaman di Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UGM (6 bulan) dengan biaya dari UNIB. Setelah selesai kursus, penulis kembali ke Fakultas Pertanian UNIB untuk mengabdikan diri sebagai dosen dan diangkat sebagai CPNS pada bulan Maret 1985. Selama 3 tahun berturut-turut sejak 1986-1988, penulis menimba pengalaman manajemen

laboratorium di Universitas Andalas dengan penyandang dana dari WUAE kerjasama dengan negara Inggris. Penulis melanjutkan studi S2 bidang Ilmu Tanah di Program Pascasarjana UGM pada bulan Agustus 1988 dengan beasiswa TMPD Dikti dan lulus Desember 1991 dengan gelar MS. Pada tahun 1996 berkesempatan melanjutkan studi S3 di Institut Pertanian Bogor bidang Ilmu Tanah dengan beasiswa Bank Pembangunan Asia (ADB) kerjasama dengan Dikti dan lulus pada tahun 2001 dengan gelar Doktor bidang Ilmu Tanah. Setelah selesai studi S3, penulis kembali ke UNIB untuk mengabdikan sebagai dosen di Fakultas Pertanian UNIB. Penulis memperoleh hibah penelitian yang didanai Kemenristekdikti (dulu: Kemdikbud), Hibah Bersaing 2 tahun (2004-2005), Hibah Fundamental 1 tahun (2007), Hibah Strategis Nasional 3 tahun (2009, 2012, 2013), Hibah Kompetensi 2 tahun (2014-2015) dan Hibah MP3EI 2 tahun (2016-2017). Beberapa hasil karya ilmiah yang telah dihasilkan penulis antara lain: 1. Menulis artikel ilmiah di koran, majalah, dan jurnal nasional, 2. Membuat buku Teknologi Tepat Guna dengan judul: Pupuk Kompos dan Cara Pembuatannya, 3. Buku Teknik Budidaya Jagung Dengan Sistem Organik di Lahan Marjinal, 4. Membuat buku ajar dengan judul: Kualitas Tanah, 5. Buku Analisis Tanah, Air, dan Tanaman. Kerjasama penelitian juga dilakukan penulis dengan pemda kabupaten/kota dan perusahaan perkebunan besar dan kecil terutama PT Agromuko (PMA).



Dr. Ir. Prasetyo, MS. Dilahirkan di Ungaran Kabupaten Semarang Jawa Tengah pada tanggal 26 Juli 1958. Pendidikan yang ditempuh sejak Sekolah Dasar (SD) hingga Sekolah Menengah Atas ditempuh di Kecamatan Ungaran, Kabupaten Semarang Jawa Tengah. Sekolah Dasar di SD

Negeri I Ungaran yang ditamatkan pada tahun 1970, kemudian melanjutkan di SMP Negeri I Ungaran yang tamat pada tahun 1973. Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri I Ungaran jurusan Paspal yang ditamatkan pada tahun 1976. Pada tahun 1977 melanjutkan pendidikan di Sekolah Tinggi Perkebunan (STIPER) Yogyakarta Jurusan teknik Perkebunan dan ditamatkan pada tahun 1982. Penulis melanjutkan studi Pascasarjana di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada tahun 1988 dan selesai pada tahun 1990 di program studi Ilmu tanaman. Melanjutkan pendidikan S-3 di Universitas Brawijaya Malang pada tahun 1998 dan diselesaikan pada tahun 2005. Penulis pernah menulis buku dengan judul "*Teknik Budidaya Karet* di Unib Press" dan "*Pengelolaan Budidaya Tanaman Obat-obatan (Bahan Simplisia)*" pada Badan Penerbitan Fakultas Pertanian Unib.



Ir. Hasanudin, MP. dilahirkan pada tanggal 5 Agustus 1959 di Desa Ambula, Cirebon, Jawa Barat. Pendidikan yang didapat meliputi SD Negeri Losari lulus tahun 1971, SMP Negeri Losari lulus tahun 1974, SMA Negeri Sindang Laut lulus tahun 1979, S1 Fakultas Pertanian di dapat dari Institut Pertanian Bogor (IPB) lulus tahun 1985 dengan gelar insinyur (Ir), S2 Fakultas Pertanian dari Universitas Padjadjaran (UNPAD) Bandung lulus tahun 1995 dengan gelar magister pertanian (MP). Setelah lulus dari IPB penulis mengabdikan diri sebagai dosen di Universitas Bengkulu sejak tahun 1986 hingga sekarang. Pengalaman pelatihan diantaranya Penataran Metodologi Penelitian tahun 1994 di Pascasarjana UNPAD Bandung, Short Training in Academic Networking in the Field of Management and Development of Animal Husbandary in the Land tahun 2005 di Jerman, dan Pelatihan Manajemen Pengelolaan Laboratorium Perguruan Tinggi Negeri tahun 2005 di Riau. Pengalaman penelitian meliputi: Peneliti Muda tahun 1989, 1998, dan 1999 dari Dikti; ADB Loan tahun 1999 dari Dikti; Hibang Bersaing tahun 1999, 2000, dan 2003 dari Dikti; PHK A2 tahun 2007 dari Dikti; Stranas tahun 2012, dan 2013 dari Dikti; dan Hibah Kompetensi tahun 2014, dan 2015. Karya ilmiah yang telah dihasilkan terdiri atas: menulis buku ajar Ilmu Gizi Tanaman, Buku Teknologi Tepat Guna judul: Pupuk Kompos dan Cara Pembuatannya, Buku Teknik Budidaya Jagung dengan Sistem Organik di Lahan Marjinal; menulis karya ilmiah lewat jurnal JIPI, Poster Sesion, dan Prosiding. Kerjasama yang telah dilakukan meliputi kerjasama perusahaan Kelapa Sawit PT Agricol Bengkulu.



Indra Cahyadinata, S.P., M.Si dilahirkan di Mukomuko, Provinsi Bengkulu pada tanggal 7 Mei 1978. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri 4 Mukomuko pada Tahun 1990, pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 1 Mukomuko pada Tahun 1993, dan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Mukomuko pada Tahun 1996. Pada Tahun 1996, penulis diterima pada program studi Agribisnis Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor melalui jalur Ujian Seleksi Masuk IPB (USMI) dan lulus pada Tahun 2001 dengan gelar Sarjana Pertanian. Tahun 2003, penulis melanjutkan pendidikan pada program studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan Sekolah Pascasarjana IPB, dan lulus pada Tahun 2005. Penulis mulai mengabdikan diri sebagai dosen di Fakultas Pertanian UNIB sejak bulan Desember 2001. Penulis pernah memperoleh hibah penelitian yang didanai Kemenristekdikti, diantaranya Penelitian Hibah Bersaing, Penelitian Fundamental dan Penelitian Strategis Nasional. Disamping itu, penulis juga pernah memperoleh Hibah Pengabdian, diantaranya Ipteks Bagi Masyarakat (IbM) dan Ipteks Bagi Inovasi Kreativitas Kampus (IbIKK).