



KESUBURAN TANAH DAN PEMUPUKAN

Ahmad Yamani



AHMAD YAMANI

KESUBURAN TANAH DAN PEMUPUKAN



KESUBURAN TANAH DAN PEMUPUKAN

Penulis:

AHMAD YAMANI

Desain Cover:

Muhammad Ricky Perdana

Tata Letak:

Noorhanida Royani

PENERBIT:

ULM Press, 2024

d/a Pusat Pengelolaan Jurnal dan Penerbitan ULM

Lantai 2 Gedung Perpustakaan Pusat ULM

Jl. Hasan Basri, Kayutangi, Banjarmasin 70123

Telp/Fax. 0511 - 3305195

ANGGOTA APPTI (004.035.1.03.2018)

Hak cipta dilindungi oleh Undang Undang

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin
tertulis dari Penerbit, kecuali

untuk kutipan singkat demi penelitian ilmiah dan resensi

I - IX + 156 hal, 15,5 × 23 cm

Cetakan Pertama. ... 2024

ISBN : ...

KATA PENGANTAR

Buku ajar ini disusun agar dapat memudahkan proses pembelajaran dalam perkuliahan bagi dosen maupun mahasiswa untuk mengikuti kajian keilmuan yang sedang dibahasnya, khususnya pada Mata Kuliah “Kesuburan Tanah dan Pemupukan”. Buku teks ini memberikan dasar-dasar teori untuk meningkatkan pengetahuan dan kemampuan merancang, melaksanakan dan melaporkan hasil-hasil pembelajaran ilmu yang sedang dipelajari.

Buku berjudul Kesuburan Tanah dan Pemupukan ini terdiri atas 16 Bab : Bab 1. Pengantar Kesuburan Tanah; Bab 2. Karakteristik Tanah; Bab 3. Proses Pembentukan Tanah; Bab 4. Pengujian dan Analisis Tanah; Bab 5. Unsur Hara Tanah; Bab 6. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kesuburan Tanah; Bab 7. Penurunan Tingkat Kesuburan Tanah Dan Upaya Peningkatannya; Bab 8. Dinamika Unsur Hara Di Hutan Alam dan Hutan Tanaman; Bab 9. Pentingnya Menjaga Keseimbangan Hara Dalam Ekosistem; Bab 10. Pemupukan Tanaman Hutan; Bab 11. Pemupukan Berbasis Kebutuhan Tanaman; Bab 12. Pengelolaan Kesuburan Tanah; Bab 13. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Kesuburan Tanah; Bab 14. Agroforestri dan Kesuburan Tanah; Bab 15. Penelitian dan Pengembangan Dalam Kesuburan Tanah; dan Bab 16. Status Kesuburan Tanah.

Penulis sudah berupaya semaksimal mungkin dalam mendeskripsikan konsep-konsep dasar Kesuburan Tanah dan Pemupukan. Namun jika terdapat kekurangan karena keterbatasan ilmu yang dimiliki maka penulis dengan senang hati akan menerima kritik dan saran yang konstruktif untuk memperbaiki buku ajar ini.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan dan penulisan buku ajar ini, juga kepada editor dan penerbit buku ini. Semoga adanya buku ajar ini memperkaya khasanah pengetahuan para pembaca dan mahasiswa, khususnya kepada mahasiswa jurusan bidang Kehutanan sebagai pegangan untuk memperdalam ilmu Kesuburan Tanah dan Pemupukan.

Banjarbaru, Oktober 2024

Penulis,

PRAKATA

Ketersediaan sumber belajar sangat diperlukan oleh para mahasiswa pada semua jenjang (D3, S1, S2 dan S3). Dalam mengembangkan bahan kuliah, para dosen biasanya merujuk kepada berbagai sumber belajar yang relevan. Ketersediaan buku ajar yang ditulis sendiri oleh Dosen Pengampu mata kuliah, khususnya pada jenjang S1 masih jarang. Ketersediaan buku teks/buku ajar mata kuliah yang ditulis oleh Dosen Pengampu mata kuliah itu sangat penting karena dosen memiliki penguasaan yang baik mengenai struktur kajian bidang ilmunya, sehingga buku tersebut akan memiliki keunggulan dibandingkan dengan buku yang ditulis oleh penulis lainnya.

Penulis berharap buku ini bisa dijadikan pegangan dan bermanfaat bagi mahasiswa untuk memperdalam ilmu kesuburan tanah dan pemupukan di bidang pertanian dan terlebih khusus bidang kehutanan dan lingkungan. Amin.

Banjarbaru, Oktober 2024

Penulis

✚ Buku ini dipersembahkan untuk :

Isteri Hj.Siti Hasanah dan anak-anak: Siti Nurhidayati, Muhammad Zaki Yamani, Siti Nisrina Nur, Muhammad Zaini Badali, Muhammad Nazamuddin dan Siti Nur Adlina serta ibunda tercinta Hj. Norhayati dengan penuh rasa cinta. Teriring doa buat cucu : Ahmad Novel dan Atikah semoga menjadi anak soleh dan solehah.

✚ Kata-kata Mutiara Imam Syafi'i tentang Ilmu dan Pendidikan

- "Tidak ada usia yang terlalu tua untuk belajar."
- "Ilmu yang baik adalah ilmu yang membawa kebaikan bagi diri dan orang lain."

SINOPSIS

Untuk membangun hutan diperlukan penguasaan ilmu pengetahuan berkenaan dengan Kesuburan Tanah dan Pemupukan. Kesuburan tanah adalah potensi tanah untuk menyediakan unsur hara dalam jumlah yang cukup, dalam bentuk yang tersedia dan seimbang untuk menjamin pertumbuhan tanaman yang optimal. Berkenaan dengan hal tersebut penting kiranya kepada para mahasiswa dan yang berkepentingan dengan bidang ilmu kehutanan dibekali dan menguasai pengetahuan kesuburan tanah dan pemupukan. Dalam buku ini menelaah kesuburan tanah dari berbagai aspek yang mencakup kesuburan tanah secara fisik, kesuburan kimiawi dan kesuburan biologi tanah yang menentukan tingkat kesuburan tanah secara keseluruhan. Dalam buku ini juga memuat tentang pupuk dan pemupukan disertai aplikasinya; siklus hara di hutan alam dan tanaman; upaya menjaga kesuburan tanah serta penentuan status kesuburan tanah. Pembahasannya didukung oleh hasil penelitian para ahli dibidangnya dan hasil penelitian penulis sendiri.

Buku ini sangat penting dimiliki dan dibaca serta dipahami oleh mahasiswa tingkat sarjana dan pascasarjana serta praktisi sebagai dasar untuk memahami dan mendalami bidang kehutanan pada khususnya dan pertanian pada umumnya.

Ahmad Yamani adalah Lektor Kepala di bidang Ilmu Tanah Hutan pada Fakultas Kehutanan Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru. Lulus Sarjana (1987); Lulus Pascasarjana Universitas Mulawarman (1996). Selain mengajar juga aktif sebagai penulis dan peneliti hingga sekarang.



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	vii
BAB 1. Pengantar Kesuburan Tanah	1
A. Konsep Kesuburan Tanah	1
B. Pengertian Kesuburan Tanah	1
C. Kesuburan Tanah dan Produktivitas	2
D. Pentingnya Kesuburan Tanah	4
E. Hubungan Antara Kesuburan Tanah dan Produktivitas Hutan	7
BAB 2. KARAKTERISTIK TANAH	8
A. Komposisi Tanah	8
B. Komposisi Fisk Tanah	9
C. Komposisi Kimia Tanah	10
D. Komposisi Biologi Tanah	10
BAB 3. PROSES PEMBENTUKAN TANAH	13
A. Faktor- Faktor Pembentuk Tanah	13
B. Faktor Lingkungan Yang Mempengaruhi Pembentukan Tanah	14
BAB 4. PENGUJIAN DAN ANALISIS TANAH	16
A. Pentingnya Pengujian Tanah	16
B. Metode Pengujian Tanah	17
BAB 5. UNSUR HARA TANAH	19
A. Sejarah Penemuan Unsur Hara	19
B. Status Anasir Unsur Hara	22
C. Anasir Unsur Hara Untuk Pertumbuhan	23
D. Analisis Untuk Mengetahui Anasir Kimia Penyusun Tanah	27
E. Analisis Jaringan Tanaman	29
F. Gejala Visual Kahat Unsur Hara	31

G. Mekanisme Unsur Hara Mendekati Akar Tanaman	33
H. Mekanisme Penyerapan Unsur Hara	35
BAB 6. FAKTOR- FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KESUBURAN TANAH ...	38
A. Faktor Fisik Tanah	38
B. Faktor Kimia Tanah	43
C. Faktor Biologi Tanah	51
D. Faktor Iklim dan Curah Hujan	56
BAB 7. PENURUNAN TINGKAT KESUBURAN TANAH DAN UPAYA PENINGKATANNYA	60
A. Faktor Penyebab Turunnya Kesuburan Tanah	60
B. Upaya Peningkatan Kesuburan Tanah	61
BAB 8. DINAMIKA UNSUR HARA DI HUTAN ALAM DAN HUTAN TANAMAN	63
A. Siklus Hara Di Hutan Alam	63
B. Siklus Hara Di Hutan Tanaman	67
BAB 9. PENTINGNYA MENJAGA KESEIMBANGAN HARA DALAM EKOSISTEM	69
A. Keseimbangan Hara	69
B. Siklus Hara N dan P	71
BAB 10. PEMUPUKAN TANAMAN HUTAN	76
A. Pupuk dan Pemupukan	76
B. Klasifikasi Pupuk	76
C. Pupuk Organik	79
D. Pupuk Anorganik	88
E. Cara Pemupukan	91
F. Pentingnya Pemupukan Dalam Pengelolaan Hutan	94
BAB 11. PEMUPUKAN BERBASIS KEBUTUHAN TANAMAN	96
A. Pendahuluan	96
B. Prinsip Pemupukan Berbasis Kebutuhan Tanaman	96
C. Teknologi dan Inovasi Dalam Pemupukan	97
BAB 12. PENGELOLAAN KESUBURAN TANAH	102

A. Praktik Pengelolaan Tanah Berkelanjutan	102
B. Penerapan Teknik Kesuburan Tanah Di Bidang Kehutanan	103
C. Kebijakan dan Praktik Berkelanjutan Dalam Pengelolaan Tanah	105
D. Penggunaan Pupuk dan Amendemen Tanah	108
E. Kesuburan Tanah Dalam Pengelolaan Hutan	108
F. Dampak HTI Terhadap Kesuburan Tanah	112
G. Dampak Kegiatan Tambang Terhadap Kesuburan Tanah	113
BAB 13. DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP KESUBURAN TANAH ...	117
A. Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Tanah	117
B. Strategi Adaptasi dan Mitigasi Untuk Tanah	119
C. Kesuburan Tanah dan Perubahan Iklim	120
BAB 14. AGROFORESTRI DAN KESUBURAN TANAH	123
A. Sistem Agroforestri	123
B. Manfaat Agroforestri	124
C. Manfaat Agroforestri Terhadap kesuburan Tanah	125
Bab 15. STATUS KESUBURAN TANAH	136
A. Langkah-Langkah Menentukan Status Kesuburan Tanah	136
B. Standar Internasional (FAO dan USDA)	139
C. Penelitian dan Pengembangan Dalam Kesuburan Tanah	144

BAB 1

PENGANTAR KESUBURAN TANAH

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan definisi dan pentingnya kesuburan tanah dalam konteks kehutanan.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kesuburan tanah.
3. Menganalisis hubungan antara kesuburan tanah dan produktivitas hutan.

A. Konsep Kesuburan Tanah

Tanah di dunia oleh USDA (1975) dikelompokkan kedalam 2 ordo yaitu : ordo tanah pelikan yaitu : alfisol, aridisol, entisol, inceptisol, molisol, oksisol, spodosol, ultisol, vertisol dan ordo tanah organik yaitu : histosol. Pembagian kelompok ordo tersebut didasarkan perbedaan jenis bahan induk, dimana ordo tanah pelikan mempunyai bahan induk berasal dari batuan, sedangkan ordo tanah organik berasal dari sisa-sisa bahan organik yang telah mengalami proses pelapukan atau terdekomposisi. Berdasar konsep ini, tanah merupakan kumpulan senyawa kimiawi dalam berbagai wujud, watak dan perangai hasil peruraian bahan induk tanah. Sebagian komponen kimiawi tersebut diperlukan jasad hidup untuk tumbuh dan berkembang. Hasil peruraian batuan dan bahan organik adalah senyawa-senyawa kimiawi.

Keterkaitan sistem tanah dengan jasad hidup (tanaman), selain pemasok anasir hara juga sebagai medium tumbuhnya. Kemampuan penyediaan anasir hara ini melibatkan berbagai proses yang dikendalikan oleh faktor tanah dan lingkungannya. Dengan demikian, maka tanah dikategorikan subur jika mampu memacu pertumbuhan dan perkembangan sampai aras yang memungkinkan fungsi-fungsi pertumbuhan dan perkembangan tanaman itu berlangsung optimal.

B. Pengertian Kesuburan Tanah

Kesuburan tanah adalah suatu keadaan tanah dimana tata air, udara dan unsur hara dalam keadaan cukup seimbang dan tersedia sesuai dengan tuntutan tanaman. Kesuburan tanah adalah kemampuan tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman dengan menyediakan unsur hara, kelembaban, dan lingkungan yang mendukung. Pendapat Sutejo (2002), kesuburan tanah adalah suatu ilmu yang mempelajari tentang kapasitas kesanggupan tanah untuk menyediakan unsur hara/makanan bagi tanaman dengan jumlah yang tepat sehingga dapat menghasilkan produksi yang optimum. Sedangkan menurut Darman (1996), kesuburan tanah adalah kapasitas atau kemampuan

tanah dalam menghasilkan produktivitas tanaman yang diinginkan pada lingkungan tertentu. Lingkungan tertentu dimaksudkan apabila karakteristik lingkungan berubah, maka kebutuhan tanaman akan berubah. Kebutuhan tanaman akan berubah bersama perubahan fisik lingkungan. Fisik lingkungan adalah faktor-faktor di luar tanah. Misalnya tanah-tanah sulfat masam yang dijumpai di daerah pasang surut mempunyai tingkat kesuburan tanah tertentu pada kondisi alamiah. Apabila tanah itu dikeringkan dengan membuat saluran drainase maka terjadi oksidasi pirit (Fe_2S , berwarna kuning emas) yang mengakibatkan kondisi yang sangat masam. Sebagai akibatnya tanaman akan mengalami toksisitas Al dan Mn. Sehingga dapat dikatakan bahwa dalam pengertian kesuburan tanah, baik faktor fisik dan faktor-faktor kimia termasuk faktor geologi mempunyai peranan yang sangat penting.

Kesuburan tanah bukan hanya tentang ketersediaan unsur hara, tetapi juga meliputi interaksi fisik, kimia, dan biologi tanah yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Kesuburan tanah secara fisik, kesuburan kimiawi dan kesuburan biologi tanah, menentukan tingkat kesuburan tanah secara keseluruhan. Menurut Brady dan Weil (2010), tanah yang subur memiliki kapasitas untuk menyimpan dan menyediakan nutrisi yang diperlukan tanaman, serta kemampuan untuk mempertahankan struktur dan aktivitas biologis yang sehat.

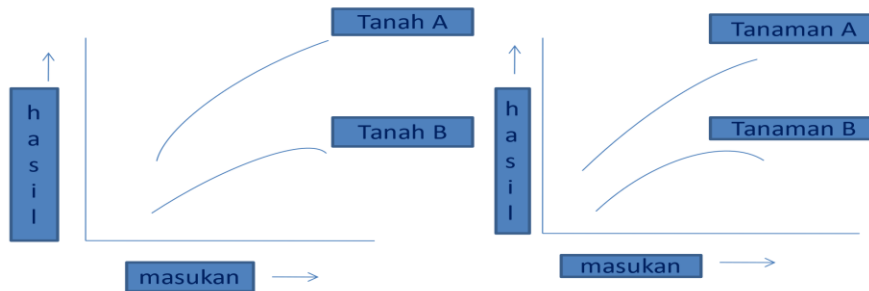
C. Kesuburan Tanah dan Produktivitas

Produktivitas tanah adalah kemampuan tanah untuk menghasilkan tanaman yang diusahakan dengan sistem pengelolaan tertentu. Produktivitas tanah merupakan perwujudan dari seluruh faktor tanah dan bukan tanah yang mempengaruhi hasil tanaman.

Menurut pakar tanah produktivitas tanah untuk berbagai jenis tanaman berdasar atas pengukuran hasil pada jangka waktu dengan sistem pengelolaan tertentu yang gayut. Produktivitas tanah merupakan telaah kemampuan tanah yang lebih berdasar pada konsep ekonomis dan bukan hanya pada watak tanah.

Ada 3 segi yang dimasukkan dalam penyusunan konsep produktivitas tanah :

- 1) Masukan (sistem pengelolaan)
- 2) Keluaran (hasil tanaman)
- 3) Tipe tanah



Gambar : Grafik Konsep Produktivitas Tanah

Catatan :

- Pendapatan bersih dpt dihitung berdasar data biaya produksi dan harga hasil produksi.
- Perhitungan ini digunakan sbg dasar penetapan nilai lahan.

Dari gambar grafik diatas, program perencanaan pengelolaan disusun dengan mempertimbangkan 2 segi penting produktivitas tanah, yakni :

1. Setiap tanah mempunyai kapasitas serap yang berbeda terhadap masukan untuk memaksimalkan keuntungan.
2. Setiap tanaman mempunyai kapasitas serap yang berbeda terhadap masukan pengelolaan untuk memaksimalkan keuntungan pada tipe tanah tertentu.

Tanah dikatakan produktif jika mempunyai aras kesuburan tertentu yang menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman. Namun tanah subur tidaklah selalu produktif, kecuali bila dikelola dengan tepat, menggunakan teknik pengelolaan dan jenis tanaman yang gayut / sesuai. Penjelasan di atas membuktikan makna produktivitas tanah tidak setara dengan kesuburan tanah.

Kesuburan tanah hanya merupakan salah satu pendukung produktivitas tanah, yang berperan mengendalikan arus masukan dan keluaran dari sistem produksi tanaman. Istilah produktivitas tanah dipakai jika pada suatu tanah diberikan masukan pengelolaan untuk memunculkan potensi kesuburan tanahnya. Konsep kesuburan tanah menekankan telaah pada faktor tanah, khususnya terkait dengan penyediaan anasir hara bagi tanaman.

Produktivitas tanah adalah kemampuan tanah untuk menghasilkan produksi tanaman tanpa mengurangi tingkat kesuburan tanahnya.

Faktor yang mempengaruhi produktivitas tanah:

1. Kesuburan tanah
2. Pemeliharaan tanaman, yaitu pemupukan
3. Rekayasa genetik

D. Pentingnya Kesuburan Tanah

Kesuburan tanah sangat penting dalam konteks kehutanan dan pertanian. Tanah yang subur mendukung keberagaman hayati, meningkatkan produktivitas tanaman, dan berkontribusi pada kesejahteraan masyarakat. Di kawasan hutan, kesuburan tanah berperan dalam proses regenerasi dan pertumbuhan pohon. Penelitian oleh Lal (2015), menunjukkan bahwa pengelolaan kesuburan tanah yang baik dapat meningkatkan hasil panen serta mempertahankan keseimbangan ekosistem.

Tantangan yang dihadapi dalam mempertahankan kesuburan tanah termasuk erosi, pencemaran, dan perubahan iklim. Pembangunan infrastruktur dan konversi lahan menjadi pemukiman atau lahan hutan tanaman industri (HTI) seringkali mengakibatkan penurunan kualitas tanah. Oleh karena itu, pemahaman tentang kesuburan tanah dan pengelolaannya sangat penting bagi mahasiswa fakultas kehutanan agar mereka dapat merancang strategi pengelolaan yang berkelanjutan.

Menjaga kesuburan tanah dalam konteks kehutanan adalah salah satu faktor kunci untuk menjaga kelestarian hutan dan ekosistem yang terkait. Tanah yang subur tidak hanya mendukung pertumbuhan tanaman, tetapi juga membantu mempertahankan siklus kehidupan yang sehat di dalam hutan.

Berikut adalah penjelasan mendalam tentang pentingnya menjaga kesuburan tanah dalam kehutanan:

➤ Mendukung Pertumbuhan Vegetasi

Tanah yang subur menyediakan unsur hara yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Dalam ekosistem hutan, pohon-pohon besar, semak, dan tanaman bawah memerlukan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang diserap dari tanah. Nutrisi

ini memungkinkan vegetasi untuk tumbuh dengan sehat, memperkuat jaringan akar yang membantu mencegah erosi tanah dan memperkaya biodiversitas.

➤ Mempertahankan Keanekaragaman Hayati

Kesuburan tanah mempengaruhi keanekaragaman hayati dalam ekosistem hutan. Tanah yang sehat mendukung pertumbuhan berbagai jenis tanaman, yang pada gilirannya mendukung keanekaragaman fauna seperti serangga, burung, dan mamalia yang bergantung pada tanaman untuk makanan dan tempat tinggal. Menurut penelitian terbaru, hutan dengan kesuburan tanah yang baik memiliki keanekaragaman hayati yang lebih tinggi dibandingkan dengan hutan yang tanahnya kurang subur.

➤ Mencegah Erosi Tanah

Tanah yang subur dan kaya bahan organik cenderung lebih stabil, sehingga lebih tahan terhadap erosi. Erosi tanah yang disebabkan oleh angin dan air dapat menyebabkan hilangnya lapisan atas tanah yang kaya nutrisi. Dalam kehutanan, erosi yang berlebihan dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan mengurangi produktivitas hutan. Oleh karena itu menjaga kesuburan tanah juga berarti melindungi hutan dari kerusakan jangka panjang.

➤ Siklus Nutrisi yang Berkelanjutan

Dalam ekosistem hutan, siklus nutrisi merupakan proses penting di mana bahan organik dari daun yang gugur dan tanaman mati diuraikan menjadi unsur hara yang bisa diserap kembali oleh tanaman hidup. Tanah yang subur mendukung mikroorganisme seperti bakteri dan jamur yang berperan dalam dekomposisi ini, yang memastikan bahwa siklus nutrisi berjalan dengan baik .

➤ Pengelolaan Ekosistem

Ekosistem hutan yang didukung oleh tanah yang subur cenderung lebih tahan terhadap gangguan seperti perubahan iklim, kebakaran hutan, atau aktivitas manusia seperti penebangan. Sebagai contoh, hutan dengan tanah yang subur lebih mampu memulihkan diri setelah terganggu oleh faktor eksternal, sehingga lebih resiliensi terhadap kerusakan .

➤ Penyediaan Sumber Daya Air dan Nutrisi

Kesuburan tanah berkaitan erat dengan kapasitas tanah untuk menahan air. Tanah yang kaya bahan organik dan gembur memiliki kapasitas yang lebih baik untuk menyimpan air, yang penting dalam siklus hidrologi hutan. Tanah yang dapat menyimpan air dengan baik akan mendukung pertumbuhan tanaman selama musim kemarau dan mengurangi risiko kekeringan di hutan .

Dalam konteks kesuburan tanah dan ekosistem hutan, penyediaan sumber daya seperti air dan nutrisi sangat penting karena tanah yang subur berperan sebagai penampung dan penyedia sumber-sumber tersebut.

Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai peran tanah subur sebagai penyedia sumber air dan nutrisi :

➤ Penyediaan Air:

Tanah yang subur memiliki kemampuan untuk menahan air dengan lebih baik. Struktur tanah yang gembur dan kaya bahan organik memungkinkan tanah untuk menyimpan lebih banyak air, yang dapat digunakan oleh tanaman selama musim kering. Ini penting dalam siklus hidrologi, di mana air yang disimpan dalam tanah secara perlahan dilepaskan kembali ke tanaman dan ekosistem.

➤ Penyediaan Nutrisi:

Tanah subur juga kaya akan unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh. Unsur hara ini tersimpan dalam bahan organik yang ada di tanah dan dilepaskan secara bertahap melalui proses dekomposisi. Tanah yang subur memungkinkan siklus nutrisi berjalan dengan baik, yang penting bagi pertumbuhan vegetasi dan keseimbangan ekosistem hutan. Dalam konteks kehutanan, menjaga kesuburan tanah berarti menjaga penyediaan sumber daya penting ini bagi tanaman dan organisme lain di dalam ekosistem hutan.

➤ Mengurangi Emisi Karbon

Tanah yang subur juga berfungsi sebagai penyerap karbon, menyimpan sejumlah besar karbon yang dihasilkan oleh organisme hutan. Proses ini membantu mengurangi emisi gas rumah kaca, yang pada akhirnya berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim. Dengan demikian, menjaga kesuburan tanah merupakan salah satu cara untuk mengurangi jejak karbon dari ekosistem hutan .

➤ Mendukung Fungsi Ekologi

Lainnya yang subur bukan hanya penting untuk mendukung vegetasi, tetapi juga mendukung berbagai proses ekologi lain seperti siklus nitrogen, pembentukan tanah, dan stabilitas struktural tanah. Semua fungsi ini penting untuk memastikan bahwa hutan berfungsi dengan baik sebagai bagian dari ekosistem global .

➤ Produktivitas Ekonomi dalam Kehutanan

Di kehutanan komersial, tanah yang subur sangat penting untuk memastikan produktivitas tanaman hutan seperti kayu, resin, dan hasil hutan non-kayu lainnya.

Menjaga kesuburan tanah dapat meningkatkan hasil produksi dan kualitas produk, yang penting untuk kesejahteraan ekonomi masyarakat yang bergantung pada hutan.

➤ Perlindungan terhadap Bencana Alam

Hutan dengan tanah yang subur memiliki sistem akar yang kuat, yang membantu menstabilkan tanah dan mencegah tanah longsor atau banjir. Tanah yang tidak subur lebih rentan terhadap kerusakan karena kehilangan struktur tanah yang padat. Oleh karena itu, menjaga kesuburan tanah dapat membantu mengurangi dampak bencana alam di daerah berhutan. Menjaga kesuburan tanah adalah salah satu tindakan paling penting untuk melestarikan hutan dan memelihara ekosistem yang seimbang, baik untuk kepentingan ekologis maupun ekonomi.

E. Hubungan Antara Kesuburan Tanah dan Produktivitas Hutan

Kesuburan tanah secara langsung mempengaruhi produktivitas hutan. Tanah yang subur menyediakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan pohon, yang pada gilirannya memengaruhi biomassa dan produktivitas hutan. Penelitian oleh Glover et al. (2010), menemukan bahwa pengelolaan kesuburan tanah yang baik dapat meningkatkan pertumbuhan pohon hingga 50% dalam jangka waktu tertentu.

Selain itu, kesuburan tanah juga berpengaruh pada keragaman spesies di suatu kawasan hutan. Tanah yang subur cenderung mendukung pertumbuhan berbagai spesies tanaman, yang berkontribusi pada keanekaragaman hayati. Menurut Zhang et al. (2018), keanekaragaman spesies tanaman yang tinggi dapat meningkatkan stabilitas ekosistem dan ketahanan terhadap perubahan lingkungan.

Faktor eksternal seperti perubahan iklim dan aktivitas manusia juga mempengaruhi kesuburan tanah dan produktivitas hutan. Penggunaan pupuk kimia secara berlebihan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air, yang berdampak negatif pada ekosistem hutan. Oleh karena itu, penting untuk memahami dampak jangka panjang dari praktik pengelolaan tanah yang tidak berkelanjutan.

Contoh Soal

1. Apa yang dimaksud dengan kesuburan tanah dan mengapa hal ini penting dalam pengelolaan hutan? (5 poin)
2. Sebutkan dan jelaskan tiga faktor yang mempengaruhi kesuburan tanah! (15 poin)
3. Bagaimana hubungan antara kesuburan tanah dan keragaman spesies di hutan? Berikan contoh! (10 poin)

BAB 2

KARAKTERISTIK TANAH

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari Bab 2 ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan komposisi fisik, kimia, dan biologis tanah.
2. Menganalisis bagaimana karakteristik tanah mempengaruhi kesuburan.
3. Mengidentifikasi pentingnya pengelolaan karakteristik tanah dalam konteks kehutanan.

A. Komposisi Tanah

Tanah terdiri dari berbagai komponen fisik, yang mencakup mineral, bahan organik, air, dan udara. Komposisi fisik tanah sangat berpengaruh terhadap kesuburan, kemampuan retensi air, dan aerasi. Secara umum, tanah terdiri dari tiga jenis partikel utama: pasir, silt, dan clay. Menurut Hillel (2004), perbandingan ketiga jenis partikel ini menentukan tekstur tanah, yang berpengaruh langsung terhadap sifat fisik dan kimia tanah.

Tanah berpasir memiliki partikel yang besar dan ruang antar partikel yang lebih luas, sehingga memungkinkan drainase yang baik, tetapi kurang mampu menyimpan air dan nutrisi. Di sisi lain, tanah liat memiliki partikel yang sangat halus dan permukaan yang lebih besar, sehingga dapat menahan lebih banyak air dan nutrisi. Penelitian oleh Brady dan Weil (2010) menunjukkan bahwa tanah liat mampu menahan nutrisi lebih baik dibandingkan tanah berpasir, namun dapat mengalami masalah dengan aerasi.

Selain tekstur, struktur tanah juga penting. Struktur tanah merujuk pada cara partikel tanah terorganisir dalam agregat. Tanah yang memiliki struktur baik akan memiliki pori-pori yang cukup untuk mendukung pergerakan air dan udara. Menurut De Jong et al. (2017), tanah dengan struktur yang baik dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme dan mendukung pertumbuhan akar tanaman.

Permeabilitas tanah juga merupakan faktor kunci yang mempengaruhi kesuburan. Tanah dengan permeabilitas tinggi memungkinkan air dan nutrisi mengalir dengan cepat, tetapi juga dapat mengakibatkan kehilangan nutrisi. Di sisi lain, tanah yang terlalu padat dapat menghambat pertumbuhan akar. Oleh karena itu, memahami komposisi fisik tanah sangat penting dalam pengelolaan kesuburan tanah.

B. Komposisi Fisik Tanah

Sifat fisik tanah berpengaruh signifikan terhadap kesuburan tanah karena mempengaruhi kemampuan tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan menahan serta mengalirkan air, udara, dan nutrisi.

Berikut adalah beberapa sifat fisik tanah yang mempengaruhi kesuburan tanah :

1). Tekstur Tanah

- Tekstur tanah menggambarkan proporsi partikel tanah berupa pasir, debu, dan lempung. Tekstur tanah mempengaruhi kemampuan tanah untuk menahan air dan udara. Tanah yang lebih bertekstur lempung umumnya lebih subur karena mampu menahan air dan nutrisi lebih baik. Menurut Sharma et al. (2023), tekstur tanah mempengaruhi retensi air dan laju infiltrasi air ke dalam tanah, yang pada gilirannya mempengaruhi ketersediaan air dan nutrisi bagi tanaman

2) Struktur Tanah

- Struktur tanah mengacu pada penggumpalan partikel tanah menjadi agregat. Struktur yang baik meningkatkan porositas, memperbaiki pergerakan udara dan air, serta meningkatkan ruang bagi akar tanaman. Dalam studi oleh Jones et al. (2022), struktur tanah yang terbentuk baik melalui proses alami maupun manajemen tanah mempengaruhi pergerakan air dan infiltrasi oksigen yang penting untuk pertumbuhan akar .

3) Kedalaman Efektif Tanah

- Kedalaman tanah yang dapat ditembus oleh akar sangat menentukan pertumbuhan tanaman. Semakin dalam akar bisa tumbuh, semakin besar volume tanah yang dapat dimanfaatkan untuk menyerap air dan nutrisi. Ascher dan Baumeister (2023), menekankan pentingnya kedalaman tanah efektif bagi akar untuk eksplorasi nutrisi, khususnya di daerah yang cenderung memiliki lapisan tanah keras di dekat permukaan .

4) Porositas Tanah

- Porositas tanah merujuk pada jumlah ruang kosong di dalam tanah yang dapat diisi oleh udara atau air. Porositas tinggi memungkinkan penetrasi air yang baik serta pertukaran udara yang lancar. Menurut studi terbaru oleh Li et al. (2023), porositas memengaruhi distribusi air dan oksigen dalam tanah, yang penting untuk pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikroorganisme tanah .

5) Kapasitas Menahan Air

- Kemampuan tanah untuk menahan air setelah hujan atau irigasi sangat penting untuk menjaga kelembapan tanah dan mencegah kekeringan. Sharma et al. (2023) menyatakan bahwa tanah dengan kapasitas menahan air tinggi, terutama yang memiliki kandungan lempung dan bahan organik yang tinggi, lebih mendukung pertumbuhan tanaman jangka panjang .

C. Komposisi Kimia Tanah

Komposisi kimia tanah mencakup unsur hara yang tersedia untuk tanaman, serta sifat kimia lain seperti pH dan kapasitas tukar kation (CTC). Unsur hara utama yang dibutuhkan tanaman meliputi nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), serta mikronutrien seperti besi, mangan, dan seng. Menurut Ryan et al. (2017), ketersediaan unsur hara ini sangat dipengaruhi oleh pH tanah dan interaksi kimia di dalamnya.

pH tanah adalah ukuran keasaman atau kebasaan tanah, yang mempengaruhi ketersediaan unsur hara. Tanah yang terlalu asam (pH rendah) dapat mengurangi ketersediaan fosfor, sementara pH yang terlalu tinggi (alkalis) dapat mempengaruhi ketersediaan mikronutrien. Penelitian oleh Cation Exchange Capacity Working Group (2018) menunjukkan bahwa tanah dengan pH antara 6 hingga 7 umumnya memiliki ketersediaan unsur hara yang optimal untuk pertumbuhan tanaman.

Kapasitas tukar kation (CTC) adalah ukuran kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan kation. Tanah dengan CTC tinggi dapat menahan lebih banyak nutrisi, sehingga lebih subur. Penelitian oleh Xu et al. (2019) menunjukkan bahwa tanah dengan kandungan bahan organik tinggi cenderung memiliki CTC yang lebih baik, sehingga meningkatkan kesuburan tanah secara keseluruhan.

Penting untuk melakukan analisis kimia tanah secara berkala agar pengelolaan kesuburan dapat dilakukan dengan efektif. Dengan mengetahui komposisi kimia tanah, pengelola hutan dapat merancang aplikasi pupuk yang tepat, sehingga efisiensi pemupukan dapat meningkat.

D. Karakteristik Biologis Tanah

Karakteristik biologis tanah mencakup berbagai mikroorganisme dan fauna tanah yang berperan penting dalam siklus hara dan kesehatan tanah. Mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan protozoa memiliki peran penting dalam dekomposisi bahan organik, yang menghasilkan nutrisi bagi tanaman. Menurut Paul dan Clark (2016), aktivitas mikrobiologi tanah dapat meningkatkan kesuburan tanah dengan mempercepat proses penguraian bahan organik.

Fauna tanah, seperti cacing tanah, juga berkontribusi terhadap kesuburan. Cacing tanah membantu memperbaiki struktur tanah dengan menggali terowongan yang meningkatkan aerasi dan drainase. Penelitian oleh Edwards dan Bohlen (2017) menunjukkan bahwa aktivitas cacing tanah dapat meningkatkan produksi tanaman hingga 25%.

Interaksi antara mikroorganisme, fauna tanah, dan tanaman sangat kompleks dan saling mempengaruhi. Mikoriza, misalnya, adalah jamur yang bersimbiosis dengan akar tanaman, membantu dalam penyerapan air dan nutrisi. Penelitian oleh Smith dan Read (2010) menunjukkan bahwa mikoriza dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan ketahanan terhadap stres lingkungan.

Perlindungan terhadap mikroorganisme dan fauna tanah sangat penting dalam pengelolaan kesuburan tanah. Praktik seperti rotasi tanaman, penambahan bahan organik, dan pengurangan penggunaan pestisida kimia dapat membantu menjaga keseimbangan ekosistem tanah.

Contoh Soal :

1. Apa saja komponen fisik tanah dan bagaimana pengaruhnya terhadap kesuburan tanah? (10 poin)
2. Jelaskan pentingnya pH dan kapasitas tukar kation dalam kesuburan tanah! (10 poin)
3. Diskusikan peran mikroorganisme dalam pengelolaan kesuburan tanah! Berikan contoh! (10 poin)

4. Apa pengaruh tekstur tanah terhadap kesuburan tanah dan bagaimana hubungannya dengan kapasitas menahan air?

Jawaban soal no. 4:

Tekstur tanah berpengaruh pada kapasitas menahan air karena tanah dengan proporsi partikel lempung yang lebih tinggi cenderung menahan air lebih baik dibandingkan tanah berpasir. Tanah berlempung memberikan lebih banyak ruang bagi air dan nutrisi untuk tersimpan, yang penting bagi pertumbuhan tanaman. Sedangkan tanah berpasir memiliki pori-pori besar yang membuat air lebih cepat hilang karena drainase yang berlebihan.

5. Mengapa porositas tanah menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas tanah?

Jawaban soal no 5:

Porositas tanah menentukan jumlah udara dan air yang dapat tersedia di dalam tanah. Jika porositasnya baik, maka akar tanaman bisa mendapatkan cukup oksigen, dan air akan tersimpan dengan baik, sehingga tanaman dapat tumbuh dengan optimal. Porositas yang rendah, sebaliknya, dapat menyebabkan genangan air atau kekeringan yang merusak.

BAB 3

PROSES PEMBENTUKAN TANAH

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan proses pembentukan tanah dan faktor-faktor yang mempengaruhinya.
2. Menganalisis peran berbagai faktor lingkungan dalam pembentukan tanah.
3. Mengidentifikasi dampak perubahan lingkungan terhadap pembentukan dan kesuburan tanah.

A. Faktor Pembentukan Tanah

Genesa tanah adalah ilmu yang mempelajari cara-cara atau proses pembentukan tanah mulai dari bahan induk. Penelitian tanah telah menunjukkan bahwa pembentuk tanah pada umumnya dipengaruhi oleh lima faktor, yaitu :

- a) Iklim (terutama suhu dan curah hujan)
- b) Organisme
- c) Bahan Induk
- d) Topografi
- e) Waktu

Proses pembentukan tanah adalah hasil dari interaksi antara bahan induk, iklim, topografi, organisme, dan waktu. Tanah terbentuk melalui beberapa proses geologis dan biologis yang saling terkait. Menurut Jenny (1941), faktor-faktor ini membentuk konsep "pedogenesis," yang menggambarkan bagaimana tanah terbentuk dan berevolusi. Pembentukan tanah dapat berlangsung selama ribuan hingga jutaan tahun, tergantung pada kondisi lingkungan.

Proses pelapukan adalah salah satu mekanisme utama dalam pembentukan tanah. Pelapukan dapat dibagi menjadi pelapukan fisik, kimia, dan biologis. Pelapukan fisik, misalnya, terjadi melalui proses seperti perubahan suhu dan tekanan yang menyebabkan retakan pada batuan. Pelapukan kimia melibatkan reaksi kimia yang mengubah mineral dalam batuan menjadi senyawa yang lebih mudah tersedia bagi tanaman. Menurut White et al. (2018), pelapukan kimia memainkan peran penting dalam menyediakan unsur hara bagi tanah.

Faktor iklim, termasuk suhu dan curah hujan, juga berkontribusi terhadap proses pembentukan tanah. Di daerah tropis, misalnya, pelapukan terjadi lebih cepat akibat curah hujan yang tinggi dan suhu yang hangat. Sebaliknya, di daerah beriklim dingin,

proses pembentukan tanah lebih lambat. Penelitian oleh Birkeland (2018) menunjukkan bahwa iklim yang lebih hangat dan lembab dapat mempercepat proses pelapukan dan meningkatkan kesuburan tanah.

Topografi juga mempengaruhi pembentukan tanah. Tanah yang terbentuk di lereng curam mungkin lebih rentan terhadap erosi, sementara tanah di dataran rendah mungkin lebih kaya akan endapan. Pengaruh topografi terhadap pembentukan tanah seringkali terlihat pada perbedaan komposisi dan sifat tanah di berbagai lokasi. Penelitian oleh Driessen dan Deckers (2001) mengidentifikasi perbedaan mendasar dalam sifat tanah berdasarkan kondisi topografi.

B. Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Pembentukan Tanah

Beberapa faktor lingkungan yang mempengaruhi pembentukan tanah termasuk bahan induk, organisme, dan waktu. Bahan induk adalah sumber material dari mana tanah terbentuk, dan komposisi mineralnya sangat mempengaruhi sifat tanah yang dihasilkan. Tanah yang terbentuk dari batuan granit, misalnya, cenderung berbeda dalam sifat fisik dan kimia dibandingkan tanah yang terbentuk dari batuan basalt. Menurut Fanning dan Fanning (1989), karakteristik mineralogis dari bahan induk sangat penting dalam menentukan kesuburan tanah.

Organisme, termasuk flora dan fauna, juga berperan dalam proses pembentukan tanah. Tanaman, misalnya, berkontribusi terhadap pembentukan humus melalui proses dekomposisi bahan organik. Mikroorganisme dalam tanah membantu menguraikan bahan organik menjadi nutrisi yang dapat digunakan oleh tanaman. Penelitian oleh Lavelle et al. (2018) menunjukkan bahwa keanekaragaman organisme tanah dapat meningkatkan stabilitas dan kesuburan tanah.

Waktu adalah faktor lain yang penting dalam pembentukan tanah. Proses pembentukan tanah memerlukan waktu yang lama, sering kali ribuan tahun, untuk menghasilkan tanah yang subur. Tanah yang lebih tua biasanya memiliki lapisan horison yang lebih berkembang, dengan komposisi mineral dan sifat yang lebih kompleks. Menurut Birkeland (2018), tanah muda cenderung memiliki lapisan horison yang kurang terdistingsi dan lebih mudah terpengaruh oleh perubahan lingkungan.

Perubahan lingkungan, seperti perubahan iklim dan aktivitas manusia, juga dapat memengaruhi pembentukan tanah. Aktivitas seperti deforestasi, pertanian intensif, dan urbanisasi dapat mengubah proses pelapukan dan erosi, sehingga berdampak pada kesuburan tanah. Penelitian oleh Keesstra et al. (2018) menunjukkan bahwa pengelolaan lahan yang tidak berkelanjutan dapat menyebabkan degradasi tanah yang serius dan penurunan kesuburan.

Contoh Soal

1. Jelaskan proses pelapukan dan perannya dalam pembentukan tanah! (10 poin)
2. Sebutkan dan jelaskan tiga faktor lingkungan yang mempengaruhi pembentukan tanah! (15 poin)
3. Diskusikan dampak aktivitas manusia terhadap proses pembentukan tanah! Berikan contoh! (10 poin)

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS TANAH

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Menjelaskan pentingnya pengujian tanah dalam pengelolaan sumber daya tanah.
- Mengidentifikasi berbagai metode pengujian tanah dan aplikasinya.
- Menganalisis hasil pengujian tanah untuk merumuskan rekomendasi pengelolaan.

A. Pentingnya Pengujian Tanah

Pengujian tanah adalah langkah penting dalam pengelolaan kesuburan tanah dan perencanaan pada hutan tanaman industri. Melalui pengujian tanah, kita dapat mengetahui komposisi kimia, fisik, dan biologis tanah yang mempengaruhi produktivitasnya. Menurut Brady dan Weil (2017), analisis tanah memungkinkan para ahli dan ilmuwan untuk memahami kondisi tanah secara lebih mendalam, sehingga dapat mengambil keputusan yang tepat terkait pemupukan dan perbaikan tanah.

Salah satu alasan utama pengujian tanah adalah untuk menentukan kebutuhan nutrisi tanaman. Tanah yang berbeda memiliki kandungan unsur hara yang berbeda pula. Analisis dapat memberikan informasi mengenai kadar nitrogen, fosfor, kalium, serta unsur mikro lainnya. Penelitian oleh Hargreaves et al. (2017), menunjukkan bahwa pengujian tanah yang teratur dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Selain itu, pengujian tanah juga penting untuk mengidentifikasi masalah kesehatan tanah, seperti pH yang tidak seimbang, salinitas tinggi, atau kandungan racun. Dalam kondisi tertentu, masalah ini dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan mengurangi hasil panen. Menurut McKenzie et al. (2021), pemahaman tentang karakteristik tanah melalui pengujian dapat membantu dalam merumuskan strategi pemulihan yang efektif.

Pengujian tanah juga dapat memberikan informasi penting mengenai kemampuan tanah dalam menyimpan air dan mengatur drainase. Tanah yang sehat harus memiliki kemampuan retensi air yang baik dan drainase yang optimal. Penelitian oleh Manna et al. (2020), menunjukkan bahwa pengujian sifat fisik tanah, seperti tekstur dan struktur, dapat memberikan wawasan tentang bagaimana tanah bereaksi terhadap hujan dan pengairan.

Selain itu, pengujian tanah berfungsi untuk memantau perubahan kualitas tanah dari waktu ke waktu. Dengan melakukan pengujian secara berkala, kita dapat mengevaluasi efek dari praktik pengelolaan yang diterapkan, seperti penggunaan pupuk organik atau metode konservasi. Menurut Sainju et al. (2018), data dari pengujian tanah dapat digunakan untuk menilai keberhasilan upaya perbaikan tanah.

Akhirnya, hasil pengujian tanah dapat menjadi dasar untuk perumusan kebijakan dan program pengelolaan sumber daya tanah yang berkelanjutan. Dengan memahami kondisi tanah secara menyeluruh, pengelola lahan dapat merencanakan praktik yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

B. Metode Pengujian Tanah

Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk melakukan pengujian tanah, tergantung pada tujuan dan jenis analisis yang diperlukan. Salah satu metode yang paling umum adalah analisis kimia tanah, yang meliputi pengukuran pH, kandungan unsur hara, dan salinitas. Menurut Sparks (2019), analisis ini sering dilakukan di laboratorium dengan menggunakan sampel tanah yang diambil dari lapangan.

❑ Analisis Kimia Tanah

Pengujian pH tanah adalah langkah pertama yang penting. pH tanah mempengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tanaman dan aktivitas mikroorganisme. pH yang optimal untuk kebanyakan tanaman berkisar antara 6 hingga 7. Penelitian oleh Zornoza et al. (2021), menunjukkan bahwa tanah dengan pH yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menyebabkan defisiensi nutrisi.

❑ Analisis Fisik Tanah

Selain analisis kimia, pengujian fisik tanah juga sangat penting. Metode seperti pengukuran tekstur tanah dapat dilakukan dengan menggunakan metode penyerapan air atau pengendapan. Tekstur tanah mempengaruhi kapasitas retensi air, drainase, dan aerasi. Menurut Bouyoucos (1962), tekstur tanah yang ideal dapat meningkatkan produktivitas tanaman.

❑ Analisis Biologi Tanah

Pengujian sifat biologis tanah juga memberikan informasi penting tentang kesehatan tanah. Pengukuran mikrobiologi, seperti jumlah mikroorganisme atau aktivitas enzim, dapat memberikan wawasan tentang kesuburan tanah. Penelitian oleh Eivazi dan Zhang (2020) menunjukkan bahwa tanah yang kaya mikroorganisme memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang lebih tinggi dan lebih mampu mendukung pertumbuhan tanaman.

Selain itu, terdapat metode pengujian non-destruktif yang semakin populer, seperti penggunaan sensor dan teknologi remote sensing. Metode ini memungkinkan pemantauan kualitas tanah tanpa merusak struktur tanah. Menurut Anderson et al. (2018), teknologi ini dapat memberikan data real-time tentang kondisi tanah, sehingga pengelolaan dapat dilakukan dengan lebih efisien.

Pengambilan sampel tanah juga merupakan tahap krusial dalam analisis. Teknik pengambilan sampel yang baik harus mempertimbangkan kedalaman dan lokasi yang representatif untuk memastikan hasil analisis yang akurat. Menurut Rayment dan Higginson (2016), pengambilan sampel yang tidak tepat dapat menyebabkan kesalahan interpretasi data.

Dengan menggunakan kombinasi berbagai metode pengujian tanah, kita dapat memperoleh gambaran yang lebih lengkap mengenai kondisi tanah dan membuat keputusan yang lebih baik terkait pengelolaannya.

Contoh Soal

1. Apa saja alasan pentingnya pengujian tanah di hutan tanaman? (10 poin)
2. Jelaskan metode pengujian fisik tanah dan mengapa hal itu penting! (10 poin)
3. Diskusikan bagaimana pengujian tanah dapat mempengaruhi kebijakan pengelolaan sumber daya tanah! (10 poin)

BAB 5

UNSUR HARA TANAH

Capaian Pembelajaran.

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan peran makronutrien dan mikronutrien dalam pertumbuhan tanaman.
2. Mengidentifikasi sumber dan siklus unsur hara dalam tanah.
3. Menganalisis dampak pH tanah terhadap ketersediaan unsur hara.

A. Sejarah Penemuan Unsur Hara

Sejarah penemuan hara tanaman adalah kisah panjang yang melibatkan penelitian bertahap selama berabad-abad, dari pemahaman kuno hingga kemajuan ilmu pengetahuan modern. Penemuan unsur hara tanaman tidak hanya menjadi tonggak penting dalam agronomi, tetapi juga mengubah cara kita memahami pertumbuhan tanaman dan manajemen kesuburan tanah. Berikut adalah perkembangan penemuan hara tanaman dari masa ke masa:

a) Masa Kuno hingga Abad Pertengahan

Pada masa kuno, pertanian sangat bergantung pada pengamatan dan praktik yang diwariskan turun-temurun. Orang Mesir dan Mesopotamia, misalnya, menggunakan lumpur sungai untuk menyuburkan tanah tanpa memahami secara ilmiah kandungan unsur hara dalam tanah tersebut. Di Yunani kuno, Theophrastus (371-287 SM), seorang murid Aristoteles, menulis tentang hubungan antara tanah dan pertumbuhan tanaman dalam bukunya *Enquiry into Plants*. Namun, pemahaman mengenai hara tanaman masih sangat terbatas dan lebih didasarkan pada observasi visual daripada penelitian ilmiah.

b) Awal Abad ke-17: Permulaan Teori Nutrisi Tanaman

Teori modern tentang nutrisi tanaman baru mulai terbentuk pada abad ke-17. Jan Baptista van Helmont, seorang ahli kimia Belgia, melakukan percobaan terkenal pada tahun 1640-an yang menunjukkan bahwa air adalah sumber utama bahan yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Ia menanam pohon willow di tanah dan hanya menambahkan air, dan setelah beberapa tahun, berat pohon bertambah signifikan sementara berat tanah hampir tidak berubah. Meski van Helmont menyimpulkan bahwa air lah yang membuat tanaman tumbuh, penelitiannya membuka jalan bagi studi lebih lanjut tentang kebutuhan hara tanaman.

c) Teori Humus dan Kritisnya Teori Nutrisi

Selama abad ke-18, teori humus mendominasi pemahaman tentang pertumbuhan tanaman. Para ilmuwan percaya bahwa tanaman mendapatkan nutrisi dari humus, yaitu materi organik yang dihasilkan dari pembusukan tumbuhan dan hewan. Namun, teori ini mulai dipertanyakan setelah Justus von Liebig melakukan penelitian revolusioner pada pertengahan abad ke-19. Liebig, seorang ahli kimia Jerman, adalah pelopor dalam pemahaman modern mengenai unsur hara tanaman. Dalam karyanya yang terkenal, *Organic Chemistry in Its Applications to Agriculture and Physiology* (1840), ia menyatakan bahwa tanaman mendapatkan unsur hara terutama dari mineral di tanah, bukan dari humus.

d) Hukum Minimum Liebig

Kontribusi Liebig yang paling terkenal adalah "Hukum Minimum", yang menyatakan bahwa pertumbuhan tanaman dibatasi oleh unsur hara yang tersedia dalam jumlah paling sedikit. Jika salah satu unsur hara esensial tidak mencukupi, maka tanaman tidak dapat tumbuh secara optimal, terlepas dari seberapa banyak unsur hara lainnya tersedia. Teori ini menandai tonggak penting dalam perkembangan teori nutrisi tanaman dan menjadi dasar pengelolaan pemupukan di seluruh dunia.

e) Penemuan Unsur Hara Makro

Setelah Liebig, penelitian terus berlanjut, terutama untuk mengidentifikasi unsur hara penting lainnya yang diperlukan oleh tanaman. Pada akhir abad ke-19, ditemukan bahwa selain karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O), tanaman juga memerlukan unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Penelitian lebih lanjut pada abad ke-20 menunjukkan pentingnya kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S) sebagai unsur hara makro tambahan.

f) Penemuan Unsur Hara Mikro

Pada awal abad ke-20, para peneliti mulai mengidentifikasi unsur-unsur yang dibutuhkan dalam jumlah sangat kecil tetapi tetap penting untuk pertumbuhan tanaman, yang kemudian disebut sebagai unsur hara mikro. Boron (B) adalah unsur hara mikro pertama yang diidentifikasi pada tahun 1923. Penemuan unsur hara mikro lainnya, seperti tembaga (Cu), seng (Zn), besi (Fe), mangan (Mn), molibdenum (Mo), dan klor (Cl), terus berkembang pada tahun-tahun berikutnya melalui percobaan laboratorium dan lapangan.

g) Pengembangan Teknologi Analisis Hara

Pada pertengahan abad ke-20, kemajuan teknologi memungkinkan analisis hara tanaman menjadi lebih presisi. Spektroskopi serapan atom dan spektroskopi emisi plasma adalah dua teknik utama yang berkembang untuk mengukur kadar unsur hara dalam jaringan tanaman dan tanah. Teknologi ini memungkinkan deteksi hara mikro dan makro dalam konsentrasi yang sangat kecil, sehingga mempermudah diagnosis kekurangan atau kelebihan hara.

h) Pendekatan Ilmiah Terhadap Pemupukan

Dengan berkembangnya pemahaman tentang hara tanaman, muncul pendekatan baru terhadap pemupukan. Pemupukan berbasis analisis jaringan tanaman mulai diterapkan secara luas, terutama pada tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan gandum. Melalui analisis ini, petani dapat menyesuaikan pemupukan dengan kebutuhan spesifik tanaman dan kondisi tanah, sehingga efisiensi penggunaan pupuk meningkat dan dampak negatif terhadap lingkungan berkurang.

i) Pengembangan Teknologi Berkelanjutan

Pada abad ke-21, perhatian terhadap keberlanjutan pertanian semakin meningkat. Penggunaan pupuk sintesis yang berlebihan telah menimbulkan masalah lingkungan seperti pencemaran air dan degradasi tanah. Oleh karena itu, teknologi modern seperti pemupukan presisi yang memanfaatkan sensor tanah dan tanaman, serta pertanian berbasis data, semakin dikembangkan untuk mengoptimalkan pemakaian hara. Teknologi nanofertilizer juga sedang dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi oleh tanaman.

j) Penelitian Terkini dan Masa Depan Nutrisi Tanaman

Penelitian terbaru difokuskan pada memahami hubungan antara mikrobioma tanah dan penyerapan hara oleh tanaman. Peneliti seperti Jones et al. (2023) menunjukkan bahwa mikroorganisme tanah memainkan peran penting dalam ketersediaan dan mobilisasi unsur hara bagi tanaman. Penelitian ini membuka peluang untuk menciptakan pupuk biologis yang berbasis mikroba untuk menggantikan sebagian penggunaan pupuk kimia konvensional, meningkatkan keberlanjutan dan kesehatan ekosistem pertanian.

Jones et al. (2023), melaporkan pentingnya mikroorganisme tanah dalam membantu mobilisasi unsur hara seperti fosfor dan nitrogen bagi tanaman, yang bisa membuka jalan bagi pendekatan baru dalam pengelolaan hara tanaman dengan pupuk biologis. Kemudian Brown et al. (2022), mendokumentasikan perkembangan teknologi

nanofertilizer yang memungkinkan distribusi hara yang lebih presisi pada tanaman dan mengurangi limbah hara di tanah.

Sejarah penemuan hara tanaman memperlihatkan betapa pentingnya pemahaman kita tentang unsur hara dalam meningkatkan produksi pangan serta menjaga keberlanjutan ekosistem pertanian.

B. Status Anasir Unsur Hara

Unsur hara adalah elemen penting yang dibutuhkan oleh tanaman untuk mendukung pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi. Status unsur hara dalam tanah menentukan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Pemahaman tentang status unsur hara penting untuk manajemen kesuburan tanah yang efektif.

○ Pengertian Unsur Hara

Unsur hara didefinisikan sebagai zat yang diperlukan tanaman untuk melengkapi siklus hidupnya. Unsur hara terdiri dari unsur hara makro (makronutrien) dan unsur hara mikro (mikronutrien). Unsur hara makro meliputi nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), sedangkan unsur hara mikro mencakup besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), dan lainnya.

○ Sumber Unsur Hara dalam Tanah

Sumber unsur hara dalam tanah meliputi bahan organik, mineral tanah, serta bahan tambahan seperti pupuk. Unsur hara yang terkandung di dalam bahan organik mengalami dekomposisi dan dilepaskan ke tanah dalam bentuk yang dapat diserap tanaman.

- Sumber Organik: Kompos, pupuk kandang.
- Sumber Anorganik: Pupuk kimia sintetis.
- Atmosfer: Nitrogen dapat diserap melalui fiksasi biologis.

○ Faktor yang Mempengaruhi Status Unsur Hara

Beberapa faktor yang mempengaruhi status unsur hara dalam tanah meliputi:

- pH Tanah: Mempengaruhi ketersediaan beberapa unsur hara seperti fosfor.
- Tekstur Tanah: Tanah bertekstur liat cenderung menyimpan lebih banyak unsur hara daripada tanah berpasir.
- Kelembapan Tanah: Kelembapan mempengaruhi mobilitas unsur hara dalam larutan tanah.
- Kandungan Bahan Organik: Tingginya bahan organik meningkatkan penyediaan unsur hara melalui dekomposisi.

○ Metode Analisis Status Unsur Hara

Ada beberapa metode yang digunakan untuk menganalisis status unsur hara dalam tanah:

- Uji Tanah: Mengukur ketersediaan unsur hara menggunakan metode ekstraksi kimia.
- Tissue Testing: Analisis jaringan tanaman untuk menentukan kandungan unsur hara dalam tanaman.
- Remote Sensing: Penggunaan teknologi citra satelit untuk memantau ketersediaan unsur hara dalam wilayah pertanian.

○ Klasifikasi Status Unsur Hara

Status unsur hara diklasifikasikan menjadi beberapa kategori berdasarkan ketersediaannya:

- Kekurangan: Tanaman menunjukkan gejala defisiensi seperti pertumbuhan terhambat atau perubahan warna daun.
- Cukup: Unsur hara tersedia dalam jumlah yang sesuai untuk kebutuhan tanaman.
- Kelebihan: Konsentrasi unsur hara terlalu tinggi, yang dapat menyebabkan toksisitas atau ketidakseimbangan nutrisi.

○ Dampak Kekurangan dan Kelebihan Unsur Hara

- Kekurangan: Kekurangan nitrogen dapat menyebabkan daun menguning, sementara kekurangan fosfor mengakibatkan pertumbuhan akar yang terhambat.
- Kelebihan: Kelebihan unsur hara seperti nitrogen dapat menyebabkan pertumbuhan vegetatif berlebihan dan menghambat pembungaan.

○ Pengelolaan Kesuburan Tanah Berbasis Status Unsur Hara

Manajemen kesuburan tanah yang efektif memerlukan penyesuaian dosis pupuk berdasarkan status unsur hara tanah. Ini termasuk :

- Penggunaan pupuk organik dan anorganik secara tepat.
- Pemantauan rutin terhadap kadar unsur hara melalui uji tanah.
- Rotasi tanaman untuk menjaga keseimbangan unsur hara.

C. Anasir Unsur Hara Untuk Pertumbuhan

Anasir hara yang dibutuhkan oleh tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangannya adalah elemen-elemen yang diperlukan untuk fungsi fisiologis dan biokimia tanaman. Pemahaman tentang peran masing-masing unsur hara tanah ini sangat penting dalam memastikan tanaman mendapatkan nutrisi yang cukup untuk tumbuh secara optimal.

Unsur hara tanah dapat dibagi menjadi dua kategori utama: makronutrien dan mikronutrien. Makronutrien adalah unsur yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah

besar, termasuk nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S). Unsur-unsur ini memainkan peran penting dalam proses fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis, sintesis protein, dan pembentukan klorofil. Menurut Marschner (2012), nitrogen adalah unsur hara yang paling penting karena berperan dalam pembentukan asam amino dan protein, yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman.

Fosfor merupakan unsur hara kedua yang sangat vital, terutama dalam pengembangan akar dan pembungaan. Kekurangan fosfor dapat menyebabkan pertumbuhan akar yang buruk dan mengurangi hasil panen. Penelitian oleh Mendoza et al. (2020), menunjukkan bahwa aplikasi pupuk fosfat yang tepat dapat meningkatkan produktivitas tanaman hingga 40% dalam kondisi tanah yang suboptimal.

Kalium berfungsi dalam mengatur keseimbangan air, meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, dan memperbaiki kualitas buah. Menurut Rafiq et al. (2021), tanaman yang cukup mendapatkan kalium lebih tahan terhadap stres lingkungan, seperti kekeringan atau serangan hama. Kalsium dan magnesium juga penting untuk pembentukan dinding sel dan fotosintesis.

Di sisi lain, mikronutrien seperti besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu) diperlukan dalam jumlah yang lebih kecil, tetapi sangat penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kekurangan mikronutrien dapat menyebabkan berbagai gejala defisiensi yang dapat memengaruhi hasil panen. Penelitian oleh Alloway (2013), menunjukkan bahwa penyediaan mikronutrien yang cukup dapat meningkatkan kualitas dan hasil panen.

Salah satu tantangan dalam pengelolaan unsur hara adalah keseimbangan antara makro dan mikronutrien. Penggunaan pupuk yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakseimbangan, yang berdampak negatif pada pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, analisis tanah secara berkala sangat penting untuk menentukan kebutuhan nutrisi yang tepat.

Berikut adalah penjelasan mendetail tentang anasir hara untuk pertumbuhan tanaman :

1). Nitrogen (N)

Nitrogen adalah salah satu unsur hara makro yang paling penting untuk pertumbuhan tanaman. Nitrogen adalah komponen utama dalam asam amino, yang merupakan bahan pembangun protein, dan juga merupakan bagian dari klorofil, senyawa yang penting untuk fotosintesis. Kekurangan nitrogen menyebabkan klorosis (daun kuning), terutama pada daun yang lebih tua, karena tanaman memobilisasi nitrogen dari jaringan tua ke jaringan muda.

2). Fosfor (P)

Fosfor berperan dalam transfer energi di dalam sel tanaman melalui senyawa-senyawa seperti ATP (adenosin trifosfat). Unsur ini juga penting dalam pembentukan asam nukleat (DNA dan RNA) dan perkembangan sistem akar yang kuat. Gejala kekurangan fosfor biasanya ditandai dengan daun berwarna hijau tua atau keunguan serta pertumbuhan akar yang terhambat.

3). Kalium (K)

Kalium mengatur tekanan osmotik di dalam sel tanaman, yang penting untuk pengendalian air dan keseimbangan ion di dalam jaringan tanaman. Kalium juga mengaktifkan enzim yang terlibat dalam sintesis protein dan fotosintesis. Kekurangan kalium dapat menyebabkan daun menguning di tepinya, lalu berubah menjadi coklat (nekrosis marginal).

4). Kalsium (Ca)

Kalsium berperan dalam pembentukan dinding sel dan memperkuat struktur tanaman. Unsur ini juga penting dalam pembelahan sel dan perkembangan jaringan baru, terutama di ujung akar dan pucuk. Kekurangan kalsium menyebabkan nekrosis di ujung daun muda, serta kerusakan pada pertumbuhan akar dan jaringan baru.

5). Magnesium (Mg)

Magnesium adalah komponen inti dari klorofil, sehingga berperan langsung dalam proses fotosintesis. Kekurangan magnesium mengakibatkan klorosis antar tulang daun, terutama pada daun yang lebih tua, karena magnesium dapat dipindahkan dari daun tua ke daun muda yang sedang berkembang.

6). Sulfur (S)

Sulfur adalah komponen penting dalam beberapa asam amino seperti sistein dan metionin, yang merupakan bagian dari protein dan enzim. Sulfur juga terlibat dalam sintesis klorofil. Kekurangan sulfur menyebabkan klorosis, namun tidak seperti kekurangan nitrogen, klorosis ini pertama kali terlihat pada daun muda.

7). Boron (B)

Boron adalah unsur hara mikro yang penting untuk pembelahan sel dan pengembangan dinding sel. Boron juga berperan dalam transportasi gula dan karbohidrat di dalam tanaman. Gejala kekurangan boron biasanya melibatkan kelainan pertumbuhan di ujung pucuk dan akar, serta cacat pada daun dan bunga.

8). Zinc (Zn)

Zinc berfungsi sebagai komponen esensial dari berbagai enzim yang terlibat dalam sintesis hormon pertumbuhan, seperti auksin. Kekurangan zinc menyebabkan kerdil pada tanaman, disertai dengan klorosis pada daun muda dan bercak-bercak putih atau merah-ungu.

9). Tembaga (Cu)

Tembaga adalah unsur penting dalam pembentukan lignin, yaitu zat yang memperkuat dinding sel tanaman. Tembaga juga terlibat dalam fotosintesis dan proses metabolisme enzim. Kekurangan tembaga dapat menyebabkan daun menjadi kaku, ujung daun mati, dan pertumbuhan tanaman yang lambat.

10). Besi (Fe)

Besi berperan penting dalam sintesis klorofil meskipun bukan merupakan bagian dari klorofil itu sendiri. Besi juga terlibat dalam proses respirasi tanaman. Kekurangan besi menyebabkan klorosis antar tulang daun pada daun muda, di mana hanya tulang daun yang tetap hijau sementara jaringan di antara tulang daun menguning.

11). Mangan (Mn)

Mangan berperan dalam proses fotosintesis, terutama dalam fotolisis air yang terjadi di kloroplas. Mangan juga terlibat dalam aktivasi enzim untuk berbagai proses metabolisme di tanaman. Gejala kekurangan mangan mirip dengan kekurangan besi, dengan klorosis pada daun muda dan bintik-bintik nekrosis pada jaringan daun.

12). Molibdenum (Mo)

Molibdenum diperlukan dalam jumlah yang sangat kecil, tetapi sangat penting untuk aktivitas enzim yang terkait dengan fiksasi nitrogen dan pengurangan nitrat. Kekurangan molibdenum menyebabkan gangguan pada metabolisme nitrogen, yang ditandai dengan klorosis antar tulang daun dan pertumbuhan tanaman yang lambat.

13). Klor (Cl)

Klor diperlukan dalam jumlah kecil tetapi esensial untuk keseimbangan ion dan pengaturan tekanan osmotik di dalam sel tanaman. Klor juga membantu dalam proses fotosintesis dan respirasi. Kekurangan klor jarang terjadi, tetapi gejalanya melibatkan daun yang layu dan tepi daun yang menguning.

Smith et al. (2023) menyatakan bahwa unsur hara mikro seperti zinc dan boron memiliki peran krusial dalam peningkatan hasil tanaman dengan membantu tanaman mengatasi stres lingkungan seperti kekeringan dan cekaman garam. Kemudian Johnson et al. (2022), meneliti bahwa kekurangan unsur hara makro seperti nitrogen dan fosfor

pada tanaman pangan global menjadi salah satu penyebab utama rendahnya hasil pertanian di negara-negara berkembang.

Anasir hara ini sangat penting bagi pertumbuhan tanaman, dan memahami kebutuhan spesifik setiap tanaman terhadap unsur-unsur tersebut membantu meningkatkan produksi tanaman secara efisien serta menjaga keberlanjutan lingkungan.

D. Analisis Kimia untuk Mengetahui Anasir Kimia Penyusun Tanah

Analisis kimia tanah bertujuan untuk menentukan kandungan unsur hara dan sifat kimia lain yang ada dalam tanah. Ada beberapa metode analisis kimia yang umum digunakan untuk mengetahui anasir (unsur) kimia penyusun tanah, menggunakan metode baku tertentu yang diakui secara internasional. Berikut ini adalah beberapa metode analisis kimia utama yang digunakan:

1). Analisis pH Tanah

Pengukuran pH tanah merupakan langkah awal yang penting karena pH mempengaruhi ketersediaan unsur hara dalam tanah. pH tanah diukur menggunakan:

- Metode Potensiometri: Menggunakan elektroda pH untuk mengukur keasaman atau kebasaan tanah dalam suspensi tanah-air dengan rasio 1:1 atau 1:2 (tanah).
- Alat: pH meter dengan elektroda kaca atau elektroda kombinasi.

2). Analisis Kandungan Nitrogen (N)

Nitrogen adalah unsur penting untuk pertumbuhan tanaman, dan analisis ini sering dilakukan dengan metode:

- Metode Kjeldahl: Ini adalah metode klasik untuk menentukan total nitrogen. Sampel tanah dipanaskan dengan asam sulfat pekat untuk mengubah nitrogen organik menjadi amonia. Amonia kemudian ditangkap dan dititrasi untuk mengetahui konsentrasi nitrogen.
- Metode Baru: Alat analyzer otomatis yang berbasis pembakaran katalitik juga mulai banyak digunakan karena lebih cepat dan akurat.

3). Analisis Fosfor (P)

Fosfor merupakan unsur hara esensial bagi tanaman, terutama untuk pertumbuhan akar.

Metode yang digunakan untuk analisis fosfor antara lain:

- Metode Bray-1 dan Olsen: Kedua metode ini menggunakan ekstraksi dengan larutan kimia untuk melepaskan fosfor dari tanah. Metode Bray-1 digunakan untuk tanah asam, sedangkan metode Olsen untuk tanah netral hingga basa.
- Spektrofotometri: Setelah fosfor diekstraksi, kandungannya diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang tertentu.

4). Analisis Kalium (K)

Kalium adalah makronutrien lain yang sangat penting bagi tanaman. Beberapa metode yang digunakan untuk analisis kalium adalah:

- Metode Amonium Asetat (NH_4OAc): Kalium diekstraksi menggunakan larutan amonium asetat dan diukur dengan Flame Photometer atau Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS).
- ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry): Teknik canggih yang juga digunakan untuk analisis banyak unsur termasuk kalium.

5). Analisis Unsur Mikro (Fe, Mn, Zn, Cu)

Unsur mikro seperti besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu) penting untuk pertumbuhan tanaman, meski dalam jumlah kecil. Metode analisis yang sering digunakan adalah:

- Metode DTPA (Diethylenetriaminepentaacetic acid): Ekstraksi unsur mikro dengan DTPA, yang kemudian diukur dengan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) atau ICP-OES.
- Metode EDTA: Mirip dengan DTPA, metode ini juga menggunakan agen chelating untuk mengekstraksi unsur mikro.

6). Analisis Bahan Organik

Kandungan bahan organik tanah mempengaruhi banyak sifat fisik dan kimia tanah. Metode yang paling sering digunakan untuk analisis bahan organik adalah:

- Metode Walkley-Black: Bahan organik dalam tanah dioksidasi menggunakan larutan kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) dalam kondisi asam. Sisa dikromat yang tidak bereaksi kemudian dititrasi untuk menentukan kandungan bahan organik.

7). Analisis Kapasitas Tukar Kation (KTK)

Kapasitas Tukar Kation (Cation Exchange Capacity - CEC) mengukur kemampuan tanah untuk menyerap dan menyimpan kation. Metode umum yang digunakan adalah:

- Metode Amonium Asetat (NH_4OAc): Tanah dijenuhkan dengan ion NH_4^+ , dan ion-ion ini kemudian disaring dan dititrasi untuk menentukan kapasitas tukar kation.

E. Analisis Jaringan Tanaman

Analisis jaringan tanaman untuk menelaah kesuburan tanah dan kecukupan pasokan hara merupakan pendekatan penting dalam agronomi dan fisiologi tanaman. Metode ini membantu petani dan ilmuwan dalam menilai apakah tanaman mendapatkan nutrisi yang cukup dari tanah atau memerlukan intervensi seperti pemupukan tambahan. Berikut adalah langkah-langkah dan cara kerja dalam analisis ini:

1). Pengambilan Sampel Jaringan Tanaman

Pengambilan sampel yang tepat sangat penting untuk mendapatkan hasil yang akurat. Umumnya, jaringan daun adalah yang paling sering dianalisis karena mencerminkan status hara tanaman. Langkah-langkahnya meliputi:

- Waktu Pengambilan Sampel: Pengambilan sampel dilakukan pada saat fase pertumbuhan kritis tanaman, misalnya saat vegetatif atau awal pembungaan.
- Bagian Tanaman yang Diambil: Daun atau jaringan muda yang baru berkembang sering dipilih karena lebih sensitif terhadap perubahan ketersediaan hara.
- Jumlah Sampel: Cukup banyak sampel diambil dari berbagai bagian tanaman untuk mendapatkan representasi yang baik.

2). Persiapan dan Pengeringan Sampel

Setelah pengambilan, sampel harus segera dikeringkan untuk mencegah perubahan komposisi hara. Proses ini meliputi:

- Pengeringan: Sampel dikeringkan pada suhu sekitar 60–70°C menggunakan oven.
- Penggilingan: Setelah kering, jaringan tanaman digiling hingga menjadi bubuk halus untuk memudahkan analisis kimia.

3). Analisis Kandungan Hara Jaringan

Setelah persiapan sampel, analisis dilakukan untuk menentukan kandungan hara utama seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), serta unsur mikro seperti besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), zinc (Zn), dan boron (B). Beberapa metode umum meliputi:

- Spektrofotometri Serapan Atom (AAS): Digunakan untuk mengukur konsentrasi logam seperti Fe, Mn, Zn, dan Cu.
- Spektroskopi Emisi Plasma (ICP-OES): Teknik canggih untuk mendeteksi unsur hara dalam jumlah yang sangat kecil.
- Kjeldahl Method: Digunakan untuk menganalisis kandungan nitrogen.

4). Interpretasi Data Hasil Analisis

Hasil analisis jaringan dibandingkan dengan standar kecukupan hara yang telah ditentukan untuk masing-masing tanaman. Jika hasil menunjukkan kekurangan atau kelebihan hara, maka intervensi dapat dilakukan, seperti penambahan pupuk atau pengelolaan tanah yang lebih baik.

- Kecukupan Hara: Jaringan tanaman yang sehat akan memiliki kadar hara dalam rentang optimal. Misalnya, nitrogen di daun seharusnya berada dalam kisaran tertentu untuk mendukung fotosintesis.
- Kekurangan Hara: Kekurangan hara tertentu, seperti nitrogen, dapat menyebabkan daun menguning (klorosis), sementara kekurangan kalium dapat menyebabkan daun tua mengering di ujungnya.
- Kelebihan Hara: Kelebihan hara tertentu juga bisa berdampak buruk, seperti toksisitas boron yang menyebabkan nekrosis (kematian sel) pada daun.

5). Aplikasi dalam Penilaian Kesuburan Tanah

Analisis jaringan tanaman memberikan indikasi langsung tentang kecukupan hara yang tersedia di tanah. Jika jaringan tanaman menunjukkan kekurangan nutrisi tertentu, maka hal itu mungkin disebabkan oleh tanah yang kekurangan unsur tersebut. Hal ini mengarahkan pada beberapa tindakan seperti:

- Uji Tanah: Untuk memastikan bahwa kekurangan hara di jaringan tanaman juga tercermin dalam ketersediaan hara di tanah, pengujian tanah secara langsung sering dilakukan. Uji ini meliputi analisis pH tanah, kapasitas tukar kation (CEC), dan kadar hara tanah.
- Pemupukan Berbasis Analisis Jaringan: Berdasarkan hasil analisis, pemupukan dilakukan dengan cara menambahkan hara yang kurang pada tanaman, baik melalui aplikasi langsung di tanah atau lewat daun (fertigasi dan foliar spraying).

F. Gejala Visual Kahat Unsur Hara

Gejala visual kekurangan hara pada tanaman sangat penting untuk mendeteksi masalah nutrisi sejak dini. Masing-masing unsur hara memiliki peran khusus dalam pertumbuhan tanaman, dan kekurangan unsur tersebut akan menimbulkan gejala visual yang khas. Berikut adalah uraian gejala kekurangan untuk masing-masing unsur hara, sitasi dari literatur terbaru, dan referensi serta glosariumnya.

1). Kahat Unsur Hara Makro

a. Nitrogen (N)

- Gejala: Daun tua menjadi kuning (klorosis), mulai dari ujung dan tepi daun. Pertumbuhan tanaman lambat, dan ukuran daun serta batang mengecil.
- Penyebab: Kekurangan nitrogen memengaruhi fotosintesis, karena nitrogen merupakan komponen klorofil.

b. Fosfor (P)

- Gejala: Daun menjadi hijau tua dengan warna keunguan atau kemerahan di bagian bawah, terutama pada tanaman muda. Pertumbuhan akar terhambat.
- Penyebab: Fosfor penting dalam pembentukan energi (ATP), sehingga kekurangan akan menyebabkan penurunan pertumbuhan.

c. Kalium (K)

- Gejala: Mengeringnya tepi daun (nekrosis marginal) dan daun yang lebih tua menjadi kuning. Pada beberapa tanaman, terlihat bercak coklat pada daun tua.
- Penyebab: Kalium penting untuk keseimbangan air dan enzim. Kekurangannya menyebabkan stres air dan terganggunya metabolisme enzim.

d. Kalsium (Ca)

- Gejala: Daun muda menggulung dan ujungnya mati (nekrosis). Akar pendek dan pertumbuhan jaringan baru terhambat.
- Penyebab: Kalsium penting untuk pembentukan dinding sel dan pertumbuhan jaringan baru.

e. Magnesium (Mg)

- Gejala: Klorosis antar tulang daun pada daun tua, dengan bagian hijau di sekitar tulang daun tetap utuh. Daun dapat menjadi kuning atau merah-ungu.
- Penyebab: Magnesium adalah komponen utama klorofil, dan kekurangannya memengaruhi fotosintesis.

f. Sulfur (S)

- Gejala: Daun muda mengalami klorosis yang mirip dengan gejala kekurangan nitrogen, tetapi terjadi lebih awal pada daun muda. Tanaman menjadi kecil dan kurus.
- Penyebab: Sulfur penting dalam sintesis protein dan enzim.

2. Kahat Unsur Hara Mikro

a. Besi (Fe)

- Gejala: Klorosis antar tulang daun terutama pada daun muda. Daun menjadi pucat atau putih pada kasus kekurangan yang parah.
- Penyebab: Besi berperan dalam sintesis klorofil dan aktivitas enzimatik.

b. Mangan (Mn)

- Gejala: Bercak klorosis antar tulang daun pada daun muda, disertai dengan bintik-bintik coklat di daun yang lebih tua.
- Penyebab: Mangan terlibat dalam pembentukan kloroplas dan enzim fotosintesis.

c. Zinc (Zn)

- Gejala: Daun muda mengalami klorosis dan terkadang disertai dengan bercak merah-ungu. Tanaman mengalami kerdil, dan ruas batang memendek.
- Penyebab: Zinc penting dalam produksi hormon pertumbuhan dan aktivitas enzim.

d. Tembaga (Cu)

- Gejala: Ujung daun mengering dan daun muda menggulung. Daun mungkin menunjukkan warna hijau tua, dan pertumbuhan terhambat.
- Penyebab: Tembaga berperan dalam pembentukan lignin dan metabolisme enzim.

e. Boron (B)

- Gejala: Daun muda menjadi cacat dan berubah warna. Pertumbuhan ujung tanaman terhenti, dan ada nekrosis pada jaringan muda.
- Penyebab: Boron penting untuk pembelahan sel dan pengangkutan karbohidrat.

f. Molibdenum (Mo)

- Gejala: Klorosis antar tulang daun pada daun tua, serta daun menggulung. Pertumbuhan lambat dan pembentukan polong berkurang pada tanaman polong-polongan.
- Penyebab: Molibdenum terlibat dalam fiksasi nitrogen dan metabolisme nitrat.

g. Klor (Cl)

- Gejala: Daun tua menguning, terutama pada ujung dan tepi, serta layu secara umum. Tanaman mungkin menunjukkan gejala layu dan kerdil.
- Penyebab: Klor diperlukan dalam pembelahan sel dan keseimbangan ion dalam tanaman.

h. Nikel (Ni)

- Gejala: Tanda kekurangan sering tidak jelas, tetapi pada kasus parah, ada klorosis dan nekrosis pada daun muda.
- Penyebab: Nikel penting dalam aktivasi enzim urease yang berperan dalam metabolisme nitrogen.

White et al. (2023) dalam studi terbaru menunjukkan bahwa analisis visual gejala kekurangan hara masih menjadi metode yang efektif untuk diagnosis awal di lapangan sebelum dilakukan analisis laboratorium. Mereka juga menunjukkan bahwa gejala visual sering dipengaruhi oleh faktor lingkungan lain seperti pH tanah dan kelembaban. Kemudian Schulte et al. (2022) menyatakan bahwa gejala kekurangan hara makro seperti nitrogen dan kalium sering kali terdeteksi pada daun tua terlebih dahulu, sementara kekurangan hara mikro seperti besi dan mangan sering mempengaruhi daun muda. Gejala visual kekurangan hara penting untuk diketahui agar tindakan pengelolaan nutrisi dapat segera diambil, seperti penambahan pupuk atau pengolahan tanah yang tepat.

G. Mekanisme Unsur Hara Mendekati Akar Tanaman

Terdapat tiga mekanisme utama di mana unsur hara mendekati akar tanaman untuk diserap:

1) Aliran Massa (Bulk Flow / mass flow)

Aliran massa adalah gerakan unsur hara / nutrisi didalam tanah menuju permukaan akar tanaman bersama-sama gerakan massa air. Gerakan massa air menuju kepermukaan akar tanaman berlangsung terus-menerus karena air terus menerus diserap akar dan menguap melalui proses transpirasi.

Unsur hara / nutrisi bergerak bersama dengan aliran air saat tanaman menyerap air dari tanah. Mekanisme ini terutama penting untuk unsur hara yang lebih mobile, seperti nitrogen, kalsium, dan magnesium. Nutrisi tersebut dibawa oleh air yang ditranspirasi oleh tanaman, dan karenanya, aliran massal sangat bergantung pada tingkat transpirasi tanaman.

- ⊙ Nitrogen (N): Sekitar 80-90% nitrogen, terutama dalam bentuk nitrat (NO_3^-), diserap melalui aliran massal karena sifatnya yang sangat larut dan mudah bergerak dalam air tanah
- ⊙ Kalsium (Ca): Lebih dari 90% kalsium diangkut melalui aliran massal, karena unsur ini sangat mobil dan bergerak bersama air yang diserap oleh akar tanaman
- ⊙ Magnesium (Mg): Sekitar 60-80% magnesium diserap melalui aliran massal, karena sifatnya yang serupa dengan kalsium dalam hal mobilitas.

2) Difusi

Ketika akar tanaman menyerap unsur hara dari larutan tanah, unsur hara lain yang terlarut dalam air bergerak menuju akar tanaman tanpa aliran air tetapi sebagai akibat hukum difusi, yaitu Bergeraknya suatu zat (unsur hara) dari bagian yang berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah.

Mekanisme ini terjadi ketika nutrisi bergerak dari area dengan konsentrasi tinggi di dalam tanah menuju area dengan konsentrasi rendah di sekitar akar tanaman. Nutrien yang relatif immobile, seperti fosfor, bergerak ke akar melalui difusi. Proses ini penting terutama ketika akar tanaman menyerap unsur hara dengan cepat sehingga menciptakan gradien konsentrasi di dekat permukaan akar.

- ⊙ Fosfor (P): Sekitar 80-90% fosfor diambil melalui difusi karena sifatnya yang tidak terlalu mobil di dalam tanah. Fosfor bergerak lambat di dalam tanah dan difusi adalah mekanisme utama yang memungkinkannya mencapai akar
- ⊙ Kalium (K): Sebanyak 20-50% kalium diserap melalui difusi. Meskipun kalium lebih mobile dibandingkan fosfor, difusi tetap memainkan peran penting, terutama dalam kondisi kadar air tanah yang rendah.

3) Intersepsi Akar (Root Interception)

Akar tanaman yang terus tumbuh dan berkembang ke dalam tanah sehingga menemukan unsur hara dalam larutan tanah di tempat tersebut. Memanjangnya akar tanaman berarti mempendek jarak yang ditempuh unsur hara untuk mendekati akar tanaman, baik melalui aliran massa atau difusi.

Ini terjadi ketika akar tanaman secara fisik bertumbuh dan bersentuhan langsung dengan partikel tanah yang mengandung nutrien. Intersepsi akar sering kali hanya menyumbang sedikit dalam total penyerapan nutrien dibandingkan dengan difusi dan aliran massal, namun tetap berperan penting terutama pada pertumbuhan akar yang agresif.

Magnesium (Mg) dan Kalium (K): Sekitar 1-5% dari kedua unsur ini diserap melalui intersepsi akar. Walaupun ini merupakan persentase kecil, intersepsi penting pada tanah yang kaya akan mineral dengan pertumbuhan akar yang intens. Secara keseluruhan, difusi penting untuk unsur hara yang kurang mobile, seperti fosfor, sementara aliran massal mendominasi untuk unsur hara yang sangat larut dalam air, seperti nitrogen dan kalsium. Intersepsi akar, meskipun minor, tetap memainkan peran penting dalam lingkungan tertentu. Ketiga mekanisme ini bekerja secara bersamaan untuk memastikan tanaman mendapatkan cukup nutrisi untuk pertumbuhan optimalnya.

Menurut Donahue et al (1977) :

- Aliran massa merupakan mekanisme penyediaan unsur hara yang utama untuk unsur hara N (98,8%), Ca (71,4%), S (95%), Mo (95,2%).
- Difusi penyediaan unsur hara untuk unsur hara P (90,9%) dan K (77,7%)
- Intersepsi akar penyediaan unsur hara untuk Ca (28,6%), sedangkan untuk yang lainnya berkisar 1,2 – 5,0 %.

H. Mekanisme Penyerapan Unsur Hara

Proses penyerapan unsur hara ke dalam akar tanaman bukan seperti hewan minum air dimana segala unsur yang di dalamnya ikut terbawa, tetapi melalui proses yang khas.

1. Diperlukan energi metabolik
2. Proses penyerapan unsur hara merupakan proses yang selektif (memilih unsur tertentu).

Penyerapan unsur hara oleh tanaman melibatkan berbagai mekanisme yang kompleks, mencakup transportasi aktif, difusi, dan penggunaan mikoriza. Berikut adalah penjelasan mendetail mengenai mekanisme ini:

1. Penyerapan Ion secara Aktif

Penyerapan unsur hara utama seperti nitrogen, fosfor, dan kalium melibatkan transport aktif melalui membran plasma sel akar. Proses ini memerlukan energi dari ATP untuk menggerakkan ion melawan gradien konsentrasi. Protein transportasi spesifik, seperti *cotransporter* dan *symporter*, memainkan peran penting dalam mengatur pengambilan unsur hara tertentu, misalnya pada fosfat dan sulfat.

2. Difusi Pasif

Unsur hara tertentu dapat masuk ke dalam sel akar secara pasif melalui difusi, yaitu proses di mana ion bergerak dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi rendah tanpa menggunakan energi. Difusi biasanya terjadi untuk unsur hara yang tersedia dalam jumlah banyak di larutan tanah, seperti kalium dan kalsium.

3. Endosimbiosis Mikoriza

Mikoriza, hubungan simbiosis antara jamur dan akar tanaman, memperluas jangkauan tanaman untuk memperoleh unsur hara dari tanah. Mikoriza arbuskular, misalnya, sangat efektif dalam meningkatkan penyerapan fosfor serta unsur mikro lainnya, seperti seng dan tembaga.

4. Penggunaan Sistem Transporter Khusus

Transporter protein seperti aquaporin dan ion channel juga memainkan peran kunci dalam mengatur aliran unsur hara seperti air dan mineral. Pada kondisi kekurangan fosfor atau sulfur, tanaman meningkatkan ekspresi gen-gen yang terkait dengan transporter ini.

5. Kontrol Sistemik dan Lokal

Penyerapan unsur hara diatur baik secara sistemik (melalui sinyal dari seluruh tanaman) maupun lokal (berdasarkan konsentrasi hara di sekitar akar). Sebagai contoh, kekurangan fosfor di tanah menyebabkan peningkatan kapasitas penyerapan fosfor oleh akar, yang diatur oleh hormon dan sinyal internal lainnya.

6. Peran Hormon Tanaman

Hormon tanaman, seperti auksin dan sitokinin, juga mempengaruhi penyerapan unsur hara. Auksin, misalnya, dapat merangsang pertumbuhan akar dan meningkatkan penyerapan nitrogen, sementara sitokinin dapat menghambat pengambilan unsur tertentu ketika jumlahnya sudah cukup di dalam tanaman.

Mekanisme penyerapan unsur hara ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan status nutrisi internal tanaman. Ketersediaan unsur hara di tanah, kondisi pH, dan interaksi dengan organisme tanah lainnya semua berkontribusi terhadap efisiensi penyerapan unsur hara oleh akar tanaman.

Contoh Soal :

1. Sebutkan dan jelaskan tiga makronutrien yang penting bagi pertumbuhan tanaman! (10 poin)
2. Bagaimana siklus nitrogen mempengaruhi kesuburan tanah? (10 poin)
3. Diskusikan peran bahan organik dalam penyediaan unsur hara! (10 poin)
4. Jelaskan mengapa pH tanah mempengaruhi ketersediaan fosfor dalam tanah?
5. Sebuah lahan pertanian menunjukkan gejala defisiensi nitrogen pada tanaman. Langkah apa yang dapat diambil untuk mengatasi masalah ini?
6. Berdasarkan uji tanah, lahan pertanian menunjukkan kelebihan unsur kalium (K). Apa dampak dari kelebihan kalium terhadap tanaman?

BAB. 6

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KESUBURAN TANAH

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kesuburan tanah.
2. Menjelaskan peran mikroorganisme dalam proses mineralisasi
3. Menganalisis hubungan antara humus dan kesuburan tanah .

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kesuburan tanah, termasuk komposisi mineral, tekstur tanah, kandungan bahan organik, pH, dan aktivitas mikroorganisme. Kesuburan tanah hutan dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang dapat dikelompokkan menjadi faktor fisik, kimia, biologi, dan pengelolaan lahan.

Berikut adalah faktor-faktor utama yang mempengaruhi kesuburan tanah hutan:

A. Faktor Fisik Tanah

1. Tekstur Tanah

Tekstur tanah (perbandingan pasir, debu, dan lempung) mempengaruhi kemampuan tanah untuk menyimpan air dan nutrisi. Tanah dengan tekstur yang seimbang, seperti lempung, cenderung lebih subur karena mampu menyimpan lebih banyak air dan menyediakan nutrisi dengan lebih baik dibandingkan tanah berpasir atau berlempung berat.

Komposisi mineral tanah, seperti kadar clay, silt, dan pasir, menentukan kapasitas tanah untuk menyimpan air dan nutrisi. Menurut Hillel (2004), tanah bertekstur halus (clay) memiliki kapasitas retensi air yang lebih tinggi dibandingkan tanah bertekstur kasar (pasir), tetapi juga dapat terpengaruh oleh aerasi dan drainase. Oleh sebab itu tekstur tanah menentukan sifat – sifat tanah sebagai berikut :

- Kemampuan memegang dan menyimpan air
- Kelancaran lalu lintas udara dan air (infiltrasi dan perkolasi/laju pergerakan air) serta permeabilitas.
- Kemampuan menyimpan hara dalam bentuk tersedia bagi tanaman dan kapasitas tukar kation (KTK).
- Kemudahan akar menembus tanah
- Daya dukung tanah, plastisitas dan sifat lekat
- Kesuburan tanah

Tanah bertekstur halus (dominant liat) permukaan lebih halus dibanding tanah bertekstur kasar, sehingga kapasitas adsorpsi unsur – unsur hara lebih besar. Tanahnya relatif lebih subur dibandingkan tanah bertekstur kasar, karena banyak mengandung unsur hara dan bahan organik. Tanah berliat banyak mempunyai pori-pori mikro (tidak porus) berfungsi dalam retensi air (water retention) serta memiliki kapasitas memegang air lebih besar dari pada tanah pasir karena memiliki permukaan yang lebih luas.

Tanah bertekstur kasar (dominan pasir) lebih porus dan laju infiltrasinya lebih cepat, memiliki makro porus yang lebih banyak yang berfungsi dalam pergerakan udara dan air. Tanah bertekstur kasar ini sulit menahan air dan kurang kandungan bahan organiknya sehingga tanahnya kurang subur.

Berikut adalah 10 aspek utama pengaruh tekstur tanah terhadap kesuburan tanah hutan:

1. Retensi Air dan Drainase : Tanah hutan yang memiliki tekstur lebih halus, seperti tanah lempung, cenderung menyimpan lebih banyak air karena ukuran partikel yang kecil menciptakan pori-pori mikro. Namun, tanah ini juga dapat menyebabkan masalah drainase yang buruk, yang mengakibatkan tanah menjadi tergenang air. Sebaliknya, tanah bertekstur kasar seperti pasir memiliki drainase yang baik, tetapi kapasitasnya untuk menyimpan air lebih rendah. Ini memengaruhi keseimbangan air yang tersedia bagi vegetasi hutan.
2. Ketersediaan Unsur Hara : Tanah lempung umumnya memiliki kemampuan lebih baik dalam menyimpan unsur hara dibandingkan dengan tanah berpasir. Hal ini disebabkan oleh luas permukaan partikel lempung yang lebih besar, memungkinkan lebih banyak kation (unsur hara) melekat. Pada tanah berpasir, unsur hara lebih cepat tercuci (leaching) karena air mengalir dengan cepat, sehingga tanaman hutan dapat mengalami kekurangan unsur hara .
3. Aerasi Tanah : Tekstur tanah juga memengaruhi aerasi atau pertukaran udara di dalam tanah. Tanah berpasir, dengan pori-pori makro yang lebih banyak, memiliki aerasi yang baik, yang penting bagi akar dan mikroorganisme dalam tanah hutan. Sebaliknya, tanah berlempung yang lebih padat dan kurang porous dapat mengalami aerasi yang buruk, menghambat aktivitas mikroorganisme pengurai bahan organik yang berperan penting dalam kesuburan tanah hutan .

4. Pembentukan Humus : Di tanah hutan, bahan organik yang terdekomposisi membentuk humus, yang sangat penting untuk memperbaiki kesuburan tanah. Tekstur tanah memengaruhi seberapa cepat proses dekomposisi ini terjadi. Pada tanah berpasir, humus lebih cepat terurai karena sirkulasi udara yang baik, namun mungkin sulit terakumulasi karena bahan organik sering tercuci. Di tanah berlempung, proses dekomposisi lebih lambat, tetapi humus yang terbentuk lebih stabil dan terikat lebih baik .
5. Struktur Tanah : Tekstur tanah berperan dalam pembentukan agregat tanah, yang penting bagi kesuburan tanah hutan. Tanah berlempung membentuk agregat yang lebih stabil karena partikel lempung membantu mengikat partikel lain. Sebaliknya, tanah berpasir cenderung memiliki agregat yang kurang stabil dan lebih mudah terdispersi, yang dapat mengurangi kualitas kesuburan tanah jika terjadi erosi atau pencucian nutrisi .
6. Aktivitas Biologis : Tanah yang memiliki tekstur halus, seperti tanah lempung, cenderung lebih mendukung kehidupan mikroorganisme tanah karena dapat mempertahankan kelembapan lebih lama. Sebaliknya, tanah berpasir yang lebih cepat kering bisa menjadi lingkungan yang kurang menguntungkan bagi mikroorganisme penting dalam proses daur ulang nutrisi, yang merupakan kunci dalam mempertahankan kesuburan tanah hutan .
7. Pengaruh terhadap Perakaran Tanaman : Akar tanaman hutan cenderung lebih mudah menembus tanah yang bertekstur kasar (pasir) karena tanahnya lebih longgar. Namun, ini juga berarti bahwa tanaman hutan mungkin menghadapi tantangan dalam menyerap cukup air dan nutrisi. Sebaliknya, tanah lempung yang lebih padat dapat membatasi perkembangan akar, tetapi memiliki keunggulan dalam menyediakan air dan nutrisi dalam jangka panjang karena kapasitas retensi yang lebih baik .
8. Peran dalam Pengendalian Erosi : Tekstur tanah yang halus, seperti lempung, lebih rentan terhadap erosi air dan angin jika struktur tanah terganggu, yang dapat mengurangi kesuburan tanah dengan hilangnya lapisan tanah atas yang kaya akan bahan organik dan nutrisi. Tanah berpasir, meskipun lebih stabil terhadap erosi angin, juga memiliki kelemahan karena unsur hara dapat lebih cepat tercuci akibat drainase yang terlalu cepat .

9. Variasi Kesuburan dalam Lanskap Hutan : Dalam ekosistem hutan, variasi tekstur tanah dalam satu lanskap dapat menciptakan perbedaan kesuburan yang signifikan. Tanah berpasir di dataran tinggi mungkin mendukung spesies pohon yang berbeda dengan tanah berlempung di dataran rendah, yang kaya akan air dan nutrisi. Perbedaan ini menciptakan mozaik produktivitas yang khas dalam ekosistem hutan .
10. Pengelolaan Tanah Hutan : Pengelolaan hutan yang efektif harus memperhatikan tekstur tanah untuk memaksimalkan kesuburan tanah dan produktivitas hutan. Misalnya, pada tanah berpasir, penambahan bahan organik seperti kompos atau humus dapat meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan nutrisi. Pada tanah lempung, praktik pengelolaan yang menjaga struktur tanah, seperti pengurangan kompaksi tanah, penting untuk mempertahankan keseimbangan air dan nutrisi.

2. Struktur Tanah

Struktur tanah merupakan susunan partikel tanah yang membentuk agregat atau gumpalan-gumpalan kecil. Struktur ini mempengaruhi banyak aspek kesuburan tanah, termasuk retensi air, pergerakan udara, infiltrasi air, aktivitas biologis, dan ketersediaan unsur hara. Sebagai komponen penting, struktur tanah menentukan seberapa baik tanaman dapat tumbuh dan berkembang di suatu lahan.

- 1) Retensi Air : Struktur tanah yang baik memungkinkan tanah menyimpan cukup air untuk mendukung pertumbuhan tanaman, tetapi juga cukup porous agar kelebihan air dapat mengalir. Tanah dengan struktur remah atau granular biasanya memiliki pori-pori yang memadai untuk menahan air tanpa menyebabkan genangan, yang penting untuk mencegah stres air pada tanaman. Sebaliknya, tanah dengan struktur kompak dapat menyebabkan air menggenang atau tidak terserap, sehingga tanaman mengalami defisiensi.
- 2) Aerasi Tanah : Struktur tanah yang terbuka memungkinkan pertukaran gas yang baik antara tanah dan atmosfer, yang penting untuk respirasi akar dan mikroorganisme tanah. Jika tanah terlalu padat, seperti pada struktur tanah yang membentuk blok atau pejal, aerasi menjadi buruk, menyebabkan penurunan aktivitas biologis dan perlambatan dekomposisi bahan organik .

- 3) Infiltrasi Air : Struktur tanah yang stabil mendorong infiltrasi air ke dalam tanah, yang membantu mencegah erosi permukaan dan memaksimalkan penggunaan air hujan. Pada tanah yang strukturnya buruk, air tidak dapat menembus ke lapisan tanah yang lebih dalam sehingga lebih banyak yang hilang sebagai limpasan. Hal ini mengurangi jumlah air yang tersedia bagi tanaman dan meningkatkan risiko erosi .
- 4) Aktivitas Mikroorganisme : Tanah dengan struktur yang baik mendukung populasi mikroorganisme yang beragam, yang berkontribusi pada siklus unsur hara. Organisme seperti cacing tanah dan bakteri pemecah bahan organik cenderung lebih aktif di tanah yang berpori, di mana ada cukup ruang untuk pergerakan udara dan air. Mikroorganisme ini memperbaiki struktur tanah dengan memecah bahan organik menjadi humus yang memperbaiki agregasi tanah .
- 5) Ketersediaan Unsur Hara : Struktur tanah yang baik juga mempengaruhi distribusi unsur hara. Dalam tanah dengan pori-pori yang baik, akar tanaman dapat menjangkau nutrisi yang lebih banyak dan lebih dalam. Pada tanah yang kompak, akar mungkin sulit berkembang, yang membatasi akses ke unsur hara. Misalnya, nitrogen dan fosfor, dua nutrisi penting bagi tanaman, lebih mudah tersedia di tanah dengan agregat yang stabil dan aerasi yang baik .
- 6) Daya Dukung Tanaman : Tanah yang Struktur baik mampu menopang akar tanaman dengan kuat, memberikan stabilitas fisik. Tanah yang sangat gembur mungkin tidak mampu memberikan dukungan mekanis yang cukup untuk tanaman besar atau tanaman dengan akar yang dangkal. Di sisi lain, tanah yang terlalu padat dapat membatasi ekspansi akar, mengurangi kemampuan tanaman untuk menyerap air dan nutrisi .
- 7) Pengaruh Bahan Organik : Bahan organik penting dalam memperbaiki struktur tanah. Dengan peningkatan bahan organik, tanah membentuk agregat yang lebih baik, meningkatkan infiltrasi air, retensi air, dan aerasi. Proses dekomposisi bahan organik juga berkontribusi pada penyediaan unsur hara yang lebih stabil bagi tanaman, yang pada gilirannya meningkatkan kesuburan tanah secara keseluruhan .

- 8) Ketahanan terhadap Erosi : Tanah dengan struktur terhadap erosi. Agregat yang stabil membuat tanah lebih sulit tererosi oleh air atau angin. Sebaliknya, tanah dengan struktur yang buruk mudah terkikis, terutama selama hujan deras atau angin kencang, sehingga kehilangan lapisan tanah atas yang kaya nutrisi .
- 9) Penyebaran Akar : Akar tanaman membutuhkan struktur tanah yang longgar sehingga akar dapat menyebar dengan baik. Di tanah dengan struktur blok atau pejal, akar cenderung terjebak di antara agregat yang padat, sehingga sulit bagi tanaman untuk mengakses nutrisi dan air yang tersedia. Sebaliknya, tanah dengan struktur granular memungkinkan akar untuk menyebar dan menyerap lebih banyak nutrisi .
- 10) Pengaruh Pengelolaan Tanah : Pengelolaan tanah yang buruk, seperti pengolayang terlalu sering atau penggunaan alat berat yang berlebihan, dapat merusak struktur tanah. Kompaksi tanah akibat pengolahan yang tidak tepat menyebabkan pengurangan porositas, yang berdampak langsung pada kesuburan. Penggunaan metode pertanian berkelanjutan seperti pertanian konservasi dapat memperbaiki atau mempertahankan struktur tanah yang baik, sehingga mendukung peningkatan kesuburan tanah .

B. Faktor Kimia Tanah

1. Bahan Organik

Bahan organik yang berasal dari sisa tanaman, hewan, dan mikroorganisme sangat penting untuk menjaga kesuburan tanah. Di hutan, lapisan serasah (litter) yang mengandung dedaunan, ranting, dan akar yang membusuk memberikan pasokan bahan organik. Bahan organik ini memperbaiki struktur tanah, menyediakan nutrisi, dan meningkatkan kemampuan tanah menyimpan air lebih banyak serta mempengaruhi aktivitas mikroorganisme tanah. Kandungan bahan organik sangat berpengaruh terhadap kesuburan tanah. Bahan organik berfungsi sebagai sumber nutrisi, meningkatkan struktur tanah, dan memfasilitasi pertumbuhan mikroorganisme yang bermanfaat. Dalam studi oleh Paul dan Clark (2016), ditemukan bahwa penambahan bahan organik dapat meningkatkan kadar nitrogen dan fosfor tanah, yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman.

➤ Perombakan Bahan Organik Menjadi Anorganik:

Proses perombakan bahan organik menjadi anorganik, dikenal sebagai *mineralisasi*, merupakan siklus penting dalam ekosistem tanah. Proses ini mengubah senyawa-senyawa organik yang berasal dari sisa-sisa makhluk hidup, seperti tanaman dan hewan, menjadi bentuk mineral yang bisa diserap oleh tanaman. Berikut penjelasan detail tentang proses ini:

➤ Sumber Bahan Organik

Bahan organik dalam tanah berasal dari berbagai sumber, termasuk daun gugur, kayu mati, bangkai hewan, dan produk ekskresi mikroorganisme dan hewan tanah. Bahan organik ini terdiri dari komponen-komponen seperti karbohidrat, protein, lipid, dan lignin, yang akan terurai melalui proses mineralisasi.

➤ Tahap Penguraian Bahan Organik

Penguraian bahan organik dimulai dengan aksi organisme dekomposer seperti bakteri, jamur, serta hewan tanah seperti cacing. Pada tahap awal, enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme ini mulai memecah molekul organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Misalnya, selulosa dan lignin yang ditemukan dalam jaringan tanaman akan diuraikan menjadi gula sederhana.

➤ Fase Fragmentasi

Fase ini merupakan tahapan mekanis dari proses penguraian. Hewan tanah seperti cacing dan serangga tanah membantu memecah sisa-sisa organik menjadi potongan yang lebih kecil, sehingga memperbesar permukaan yang bisa diakses oleh mikroorganisme.

➤ Fase Kematangan Kompos

Selama proses dekomposisi, zat-zat organik diubah menjadi humus. Humus adalah senyawa organik yang tahan terhadap dekomposisi lebih lanjut. Kehadiran humus sangat penting untuk menjaga struktur tanah, mempertahankan kelembapan, dan menyediakan nutrisi yang dilepaskan secara perlahan kepada tanaman.

➤ Mineralisasi Nitrogen

Dalam siklus nitrogen, nitrogen organik diubah menjadi ammonium (NH_4^+) melalui proses amonifikasi. Proses ini dilakukan oleh mikroorganisme tanah yang memecah protein dan asam amino dalam bahan organik. Selanjutnya, ammonium diubah menjadi nitrat (NO_3^-) melalui proses nitrifikasi oleh bakteri nitrifikasi. Nitrat inilah yang mudah diserap oleh akar tanaman.

➤ Mineralisasi Fosfor dan Unsur Lain

Selain nitrogen, mineralisasi juga melibatkan unsur hara lainnya seperti fosfor, kalium, kalsium, dan magnesium. Fosfor yang terikat dalam bahan organik diubah menjadi fosfat anorganik oleh bakteri fosfatolitik. Fosfat yang tersedia ini penting untuk pertumbuhan akar dan pembentukan biji.

➤ Proses Denitrifikasi

Dalam kondisi anaerob (kurangnya oksigen), nitrat yang dihasilkan dari proses nitrifikasi dapat diubah kembali menjadi nitrogen gas (N₂) melalui proses denitrifikasi. Proses ini dilakukan oleh bakteri denitrifikasi, dan nitrogen gas ini kembali ke atmosfer. Siklus ini menjaga keseimbangan nitrogen dalam tanah.

➤ Faktor-faktor yang Mempengaruhi Mineralisasi

Proses mineralisasi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, kelembapan, pH tanah, dan kandungan oksigen. Tanah yang lebih hangat, lembab, dan mengandung oksigen tinggi biasanya memiliki tingkat mineralisasi yang lebih tinggi. Selain itu, bahan organik yang lebih sederhana dan mudah terurai akan lebih cepat diuraikan dibandingkan bahan yang lebih kompleks seperti lignin.

➤ Peran Enzim dalam Proses Mineralisasi

Enzim-enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme tanah berperan penting dalam proses ini. Beberapa enzim utama yang terlibat termasuk protease (mengurai protein), lipase (mengurai lemak), dan selulase (mengurai selulosa). Tanpa enzim-enzim ini, proses dekomposisi tidak bisa berlangsung dengan efisien.

➤ Manfaat Mineralisasi bagi Tanaman

Hasil akhir dari proses mineralisasi adalah tersedianya unsur hara yang dapat diserap oleh akar tanaman. Nitrat, fosfat, kalium, dan unsur mikro lainnya seperti seng dan besi sangat dibutuhkan tanaman untuk pertumbuhan optimal. Unsur-unsur ini berperan dalam proses fotosintesis, pembentukan jaringan, dan pertahanan terhadap penyakit.

➤ Hubungan dengan Kesuburan Tanah

Kesuburan tanah sangat bergantung pada kecepatan dan efisiensi proses mineralisasi. Tanah yang kaya bahan organik dan memiliki aktivitas mikroorganisme yang tinggi akan memiliki siklus mineralisasi yang cepat, sehingga memberikan pasokan nutrisi yang berkelanjutan bagi tanaman.

➤ Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Perombakan Bahan Organik

Perombakan bahan organik di tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor yang memengaruhi kecepatan dan efisiensi proses dekomposisi dan mineralisasi.

Berikut adalah faktor-faktor utama yang mempengaruhi perombakan bahan organik:

1) Suhu

Suhu memegang peran penting dalam aktivitas mikroorganisme yang bertanggung jawab atas dekomposisi bahan organik. Pada suhu yang lebih tinggi (biasanya antara 25–35°C), aktivitas mikroorganisme meningkat sehingga proses perombakan bahan organik berlangsung lebih cepat. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah memperlambat proses dekomposisi, karena mikroorganisme menjadi kurang aktif atau dorman. Namun, suhu yang terlalu tinggi juga bisa merusak enzim dan organisme dekomposer.

2) Kelembapan

Kelembapan tanah yang cukup diperlukan untuk aktivitas optimal mikroorganisme dan enzim. Mikroorganisme memerlukan air untuk transportasi nutrisi, dan kelembapan tanah yang tinggi dapat mempercepat dekomposisi. Jika tanah terlalu kering, proses dekomposisi akan terhambat karena mikroorganisme tidak dapat berfungsi secara optimal. Sebaliknya, jika tanah terlalu jenuh dengan air, proses dekomposisi anaerob (tanpa oksigen) akan dominan, yang umumnya lebih lambat dibandingkan dengan proses aerobik (dengan oksigen).

3) pH Tanah

pH tanah menentukan lingkungan kimia yang mendukung aktivitas mikroorganisme. Sebagian besar mikroorganisme dekomposer bekerja optimal pada pH netral hingga sedikit asam (pH 6–7). Jika pH terlalu rendah (sangat asam) atau terlalu tinggi (sangat basa), aktivitas mikroorganisme akan menurun, sehingga memperlambat proses dekomposisi. Tanah yang sangat asam, misalnya, bisa menghambat pertumbuhan bakteri nitrifikasi yang mengubah amonia menjadi nitrat.

4) Kandungan Oksigen

Oksigen diperlukan oleh mikroorganisme aerobik untuk memecah bahan organik. Tanah yang teroksigenasi baik, seperti tanah berstruktur gembur, akan mengalami dekomposisi lebih cepat karena aktivitas mikroorganisme aerobik. Tanah yang terlalu padat atau jenuh air menghambat pertukaran gas sehingga menyebabkan kondisi anaerob, yang memperlambat proses dekomposisi. Bakteri cenderung lebih sensitif terhadap perubahan pH dibandingkan dengan jamur.

5) Tipe Bahan Organik

Komposisi kimia bahan organik yang diuraikan juga memengaruhi laju perombakan. Bahan organik yang mudah terurai, seperti gula, protein, dan pati, akan terdekomposisi lebih cepat karena lebih mudah diakses oleh mikroorganisme. Di sisi lain, senyawa yang lebih kompleks, seperti lignin, selulosa, dan lilin, membutuhkan waktu lebih lama untuk diuraikan karena lebih tahan terhadap aktivitas enzim mikroorganisme.

6) Jumlah dan Aktivitas Mikroorganisme

Kehadiran dan keragaman mikroorganisme, termasuk bakteri, jamur, dan protozoa, sangat penting dalam perombakan bahan organik. Semakin banyak dan beragam jenis mikroorganisme dalam tanah, semakin cepat proses dekomposisi berlangsung. Aktivitas mikroorganisme ini dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi, kondisi lingkungan (suhu, kelembapan, oksigen), serta kompetisi antar mikroorganisme itu sendiri.

7) Kandungan Nitrogen dalam Bahan Organik

Rasio karbon terhadap nitrogen (C/N ratio) dalam bahan organik sangat berpengaruh terhadap laju dekomposisi. Bahan organik dengan rasio C/N rendah (kaya nitrogen), seperti daun muda atau limbah dapur, lebih cepat terurai karena nitrogen merupakan unsur penting bagi pertumbuhan mikroorganisme. Sebaliknya, bahan dengan rasio C/N tinggi (kaya karbon), seperti kayu mati atau jerami, akan terurai lebih lambat karena mikroorganisme harus berkompetisi untuk mendapatkan nitrogen yang tersedia dalam jumlah terbatas.

8) Aktivitas Biota Tanah

Biota tanah, seperti cacing tanah, serangga, dan hewan kecil lainnya, juga berperan dalam proses dekomposisi. Cacing tanah, misalnya, memecah bahan organik menjadi potongan-potongan kecil, yang meningkatkan luas permukaan bahan tersebut dan memudahkan akses mikroorganisme. Selain itu, ekskresi dari hewan tanah ini juga dapat mempercepat dekomposisi bahan organik.

9) Struktur Tanah

Struktur tanah berhubungan dengan bagaimana partikel tanah berkumpul bersama-sama, membentuk agregat yang mempengaruhi porositas tanah dan sirkulasi udara. Tanah yang gembur dengan struktur yang baik akan memfasilitasi aerasi dan drainase yang baik, memungkinkan mikroorganisme untuk lebih aktif dalam proses perombakan. Sebaliknya, tanah yang terlalu padat atau kompak akan mengurangi aerasi dan memperlambat proses dekomposisi.

10) Kandungan Mineral dalam Tanah

Ketersediaan mineral tertentu, seperti fosfor, kalium, dan kalsium, dapat memengaruhi aktivitas mikroorganisme tanah. Kekurangan mineral esensial dapat memperlambat pertumbuhan mikroorganisme dan memperlambat dekomposisi. Sebaliknya, tanah yang kaya mineral cenderung mendukung mikroorganisme lebih baik dan mempercepat proses perombakan.

11) Jenis Tanaman dan Vegetasi

Jenis tanaman yang tumbuh di atas tanah juga berpengaruh terhadap laju perombakan bahan organik. Tanaman dengan sistem akar yang mendalam dan luas, seperti legum, membantu dalam siklus nutrisi yang lebih cepat karena mereka menambahkan lebih banyak bahan organik ke tanah. Selain itu, jenis vegetasi tertentu juga memproduksi eksudat akar yang mendukung populasi mikroorganisme.

12) Kehadiran Polutan

Polutan, seperti pestisida dan logam berat, dapat menghambat aktivitas mikroorganisme dan biota tanah lainnya. Pestisida, terutama yang bersifat toksik, dapat membunuh mikroorganisme pengurai, sementara logam berat seperti timbal dan merkuri dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme, memperlambat proses dekomposisi bahan organik.

Dengan memahami faktor-faktor ini, pengelolaan tanah untuk tujuan rehabilitasi hutan dan lahan atau rehabilitasi lingkungan bisa lebih efektif dalam mendukung proses perombakan bahan organik, yang pada akhirnya berkontribusi pada kesuburan tanah dan produktivitas tanaman.

2. pH Tanah

Tingkat keasaman (pH) tanah sangat memengaruhi ketersediaan nutrisi. Tanah hutan tropis cenderung bersifat asam (pH rendah), terutama jika tanahnya terdiri dari tanah gambut. pH yang terlalu rendah dapat mengurangi ketersediaan nutrisi seperti fosfor, tetapi meningkatkan ketersediaan aluminium yang bersifat toksik bagi tanaman.

Banyak tanaman memiliki kisaran pH optimum di mana mereka dapat menyerap nutrisi secara efektif. pH yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat penyerapan nutrisi. Sebuah studi oleh Goh et al. (2016), menunjukkan bahwa penyesuaian pH tanah dapat meningkatkan produktivitas tanaman hutan.

2.1 Pengaruh pH Tanah Terhadap Kesuburan Tanah

➤ pH Tanah dan Aktivitas Mikroorganisme

pH tanah secara langsung mempengaruhi aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam proses dekomposisi bahan organik dan mineralisasi nutrisi. Pada kisaran pH 6-7, aktivitas mikroorganisme dekomposer seperti bakteri dan jamur berada pada tingkat optimal. Dalam kondisi pH netral hingga sedikit asam ini, mikroorganisme dapat memecah bahan organik menjadi nutrisi yang lebih mudah diserap oleh tanaman, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Pada pH yang terlalu rendah (sangat asam) atau terlalu tinggi (sangat basa), aktivitas mikroorganisme menurun secara drastis, yang berakibat pada penurunan laju dekomposisi bahan organik dan ketersediaan nutrisi penting.

➤ Pengaruh pH pada Ketersediaan Nutrisi Makro

pH tanah memengaruhi ketersediaan nutrisi makro seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, yang sangat dibutuhkan tanaman untuk pertumbuhan. Pada pH optimal (6-7), unsur-unsur ini berada dalam bentuk yang mudah diserap oleh akar tanaman. Pada tanah yang terlalu asam (pH di bawah 5,5), fosfor cenderung terikat oleh aluminium dan besi, sehingga menjadi tidak tersedia bagi tanaman. Sebaliknya, pada pH yang terlalu basa (pH di atas 8), fosfor bisa terikat oleh kalsium, juga mengurangi ketersediaannya. Nitrogen dan kalium juga lebih mudah tersedia pada kisaran pH netral.

➤ Pengaruh pH pada Ketersediaan Nutrisi Mikro

Selain nutrisi makro, pH juga memengaruhi ketersediaan unsur hara mikro seperti seng (Zn), tembaga (Cu), mangan (Mn), dan besi (Fe). Pada tanah yang bersifat asam (pH di bawah 6), unsur-unsur hara mikro ini umumnya lebih tersedia, namun dalam kondisi yang terlalu asam, kandungan logam berat seperti aluminium (Al) dan besi dapat menjadi toksik bagi tanaman. Pada tanah yang basa (pH di atas 7,5), unsur-unsur mikro ini cenderung mengendap atau menjadi tidak tersedia bagi tanaman, sehingga dapat menyebabkan defisiensi unsur hara mikro yang penting.

➤ Dampak pH Terhadap Struktur Tanah

pH tanah memengaruhi agregasi partikel tanah, yang berdampak pada struktur tanah. Pada pH optimal, kation seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) membantu menyatukan partikel tanah menjadi agregat yang lebih stabil. Ini meningkatkan porositas tanah dan kapasitas retensi air, yang penting untuk pertumbuhan akar dan serapan nutrisi. Sebaliknya, pada tanah yang sangat asam, kehadiran aluminium yang larut dapat mengganggu stabilitas agregat tanah, menyebabkan tanah menjadi lebih kompak, mengurangi infiltrasi air, dan meningkatkan erosi.

➤ Pengaruh pH Terhadap Serapan Nutrisi oleh Tanaman

pH tanah memengaruhi kemampuan akar tanaman untuk menyerap nutrisi. Pada pH yang ideal (6-7), akar tanaman mampu menyerap nutrisi makro dan mikro dengan efisien. Namun, pada tanah yang sangat asam, ion hidrogen (H^+) dalam jumlah besar dapat merusak sistem akar dan menyebabkan ion aluminium yang beracun bagi tanaman menjadi lebih larut. Ini menghambat pertumbuhan akar dan mengurangi kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi. Demikian pula, pada pH basa, akar tanaman mungkin kesulitan menyerap beberapa nutrisi mikro karena nutrisi tersebut cenderung mengendap. Ketersediaan unsur hara juga dipengaruhi oleh pH tanah. Tanah yang sangat asam atau sangat basa dapat mengikat unsur hara, sehingga menyulitkan tanaman untuk menyerapnya. Penelitian oleh Kuo et al. (2017) menunjukkan bahwa pH optimal untuk ketersediaan unsur hara adalah antara 6 hingga 7, di mana sebagian besar unsur hara tersedia dalam bentuk yang dapat diserap.

➤ Pengaruh pH pada Kehidupan Biota Tanah

pH tanah yang tepat mendukung kehidupan biota tanah, seperti cacing tanah, nematoda, dan serangga. Biota ini penting dalam memperbaiki struktur tanah, mempercepat perombakan bahan organik, dan membantu siklus nutrisi. Pada tanah yang sangat asam atau basa, populasi dan aktivitas biota tanah bisa menurun, mengakibatkan gangguan dalam siklus nutrisi. Sebagai contoh, cacing tanah lebih menyukai tanah dengan pH netral hingga sedikit asam, dan mereka membantu memperbaiki aerasi tanah serta mempercepat dekomposisi bahan organik.

➤ Efek pH Terhadap Toksisitas Aluminium dan Mangan

Pada tanah yang sangat asam (pH di bawah 5,5), aluminium dan mangan menjadi lebih larut dan dapat mencapai tingkat toksisitas bagi tanaman. Toksisitas aluminium adalah salah satu masalah utama pada tanah asam, karena ion aluminium yang larut dapat merusak akar tanaman, menghambat pertumbuhan, dan mengurangi serapan nutrisi penting. Mangan yang berlebihan juga bisa menghambat pertumbuhan tanaman dan mengganggu proses fotosintesis.

➤ Pengaruh pH Terhadap Aplikasi Pupuk dan Bahan Organik

pH tanah juga mempengaruhi efektivitas pupuk dan bahan organik yang ditambahkan ke dalam tanah. Pada pH yang optimal, pupuk nitrogen, fosfor, dan kalium dapat bekerja dengan lebih efektif, karena unsur-unsur tersebut berada dalam bentuk yang lebih mudah diserap oleh tanaman. Sebaliknya, pada pH ekstrem (terlalu asam atau

terlalu basa), efektivitas pupuk bisa menurun karena terjadi pengikatan atau pengendapan nutrisi.

➤ Pengaruh pH Terhadap Laju Dekomposisi Bahan Organik

Laju dekomposisi bahan organik dipengaruhi oleh pH tanah. Pada pH yang optimal (netral hingga sedikit asam), aktivitas mikroorganisme dekomposer, seperti bakteri dan jamur, mencapai puncaknya. Ini menyebabkan perombakan bahan organik menjadi lebih cepat, yang pada akhirnya meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Namun, pada pH yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, dekomposisi melambat, mengurangi kontribusi bahan organik terhadap kesuburan tanah.

➤ Pengelolaan pH Tanah untuk Kesuburan yang Optimal

Mengelola pH tanah merupakan langkah penting untuk memastikan tanah tetap subur. Di daerah dengan tanah yang terlalu asam, pengapuran dapat dilakukan untuk menaikkan pH dan mengurangi toksisitas aluminium. Di sisi lain, tanah yang terlalu basa dapat diatur dengan menambahkan bahan organik, sulfur, atau pupuk yang bersifat asam untuk menurunkan pH. Pemantauan pH secara berkala dengan uji tanah sangat penting untuk menjaga keseimbangan nutrisi yang optimal dan mempertahankan kesuburan tanah.

C. Faktor Biologi Tanah

☐ Makroorganisme Tanah

Makroorganisme tanah adalah organisme berukuran besar yang hidup di dalam tanah, seperti cacing tanah, rayap, semut, dan berbagai jenis serangga lainnya. Mereka memiliki peran penting dalam proses perombakan (dekomposisi) bahan organik, yang berkontribusi secara signifikan terhadap kesuburan tanah. Aktivitas makro fauna tanah ini mempengaruhi struktur fisik tanah, siklus nutrisi, dan ketersediaan nutrisi bagi tanaman, membantu meningkatkan aerasi tanah dan memfasilitasi pergerakan air.

Berikut adalah penjelasan mengenai peran makrofauna tanah dalam perombakan bahan organik dan bagaimana mereka dapat meningkatkan kesuburan tanah:

1) Pemecahan Bahan Organik Menjadi Partikel yang Lebih Kecil

Makrofauna tanah, seperti cacing tanah dan serangga, berperan langsung dalam memecah bahan organik menjadi partikel yang lebih kecil. Proses ini terjadi ketika mereka memakan sisa-sisa tumbuhan, serasah, dan bahan organik lainnya yang ada di permukaan tanah atau di dalam lapisan tanah. Pemecahan fisik ini memperluas luas permukaan bahan organik, yang kemudian memudahkan mikroorganisme seperti

bakteri dan jamur untuk mendegradasi senyawa organik tersebut menjadi nutrisi yang lebih sederhana dan lebih mudah diserap oleh tanaman.

2) Peningkatan Aerasi Tanah Melalui Aktivitas Penggalian

Cacing tanah dan makrofauna lainnya menggali dan membuat terowongan di dalam tanah. Aktivitas penggalian ini meningkatkan porositas tanah dan aerasi, yang sangat penting untuk pertumbuhan akar tanaman dan aktivitas mikroorganisme tanah. Tanah yang memiliki sirkulasi udara yang baik memungkinkan oksigen untuk mencapai akar dan mikroorganisme, yang mempercepat proses perombakan bahan organik. Selain itu, peningkatan aerasi tanah juga mencegah kondisi anaerob yang dapat memperlambat proses dekomposisi.

3) Pembentukan Struktur Tanah yang Lebih Stabil

Makrofauna tanah membantu membentuk agregat tanah, yaitu gumpalan-gumpalan partikel tanah yang lebih besar dan stabil. Cacing tanah, misalnya, menghasilkan ekskresi yang berfungsi sebagai "lem" alami yang menyatukan partikel-partikel tanah. Agregat tanah yang stabil ini meningkatkan struktur tanah, memperbaiki kapasitas retensi air, serta meningkatkan porositas dan drainase tanah. Struktur tanah yang baik sangat penting untuk mendukung pertumbuhan tanaman, karena memungkinkan akar untuk tumbuh lebih bebas dan menyerap nutrisi dengan lebih efisien.

4) Meningkatkan Ketersediaan Nutrisi melalui Perombakan Bahan Organik

Makrofauna tanah memakan bahan organik, seperti daun-daun yang gugur, akar mati, dan sisa-sisa tanaman lainnya. Setelah dicerna, bahan organik ini diubah menjadi bentuk yang lebih sederhana melalui proses enzimatik di dalam saluran pencernaan makrofauna. Produk ekskresi dari makrofauna ini mengandung nutrisi penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium dalam bentuk yang lebih mudah diakses oleh tanaman. Oleh karena itu, aktivitas makrofauna tanah secara langsung berkontribusi pada peningkatan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.

5) Penguraian Bahan Organik Kompleks

Bahan organik yang kompleks, seperti lignin dan selulosa, memerlukan waktu yang lebih lama untuk diuraikan oleh mikroorganisme tanah. Makrofauna tanah memainkan peran penting dalam mempercepat penguraian bahan organik kompleks ini. Misalnya, cacing tanah memakan sisa tanaman yang mengandung lignin dan selulosa, memecahnya secara mekanis, dan mempercepat akses mikroorganisme pengurai terhadap bahan organik tersebut. Hasil akhirnya adalah dekomposisi bahan organik yang lebih cepat, yang meningkatkan siklus nutrisi di dalam tanah.

6) Mengurangi Akumulasi Bahan Organik di Permukaan Tanah

Dengan aktivitas makan dan penggalian, makrofauna tanah membantu mengurangi akumulasi serasah dan sisa-sisa tumbuhan di permukaan tanah. Jika bahan organik ini dibiarkan menumpuk tanpa proses perombakan yang memadai, siklus nutrisi bisa terhambat dan tanah menjadi kurang subur. Dengan membantu mendistribusikan bahan organik ke dalam lapisan tanah, makrofauna tanah mempercepat proses perombakan dan memastikan bahwa nutrisi dari bahan organik tersebut dapat digunakan kembali oleh tanaman.

7) Mendukung Kehidupan Mikroorganisme Tanah

Aktivitas makrofauna tanah juga menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi kehidupan mikroorganisme tanah. Terowongan yang dibuat oleh makrofauna meningkatkan aerasi dan kelembapan tanah, yang merupakan kondisi ideal bagi pertumbuhan bakteri, jamur, dan mikroorganisme dekomposer lainnya. Hubungan simbiotik ini sangat penting, karena mikroorganisme juga berperan dalam memecah bahan organik menjadi bentuk yang lebih sederhana, sehingga ketersediaan nutrisi di dalam tanah semakin meningkat.

8) Peran dalam Bioturbasi dan Siklus Nutrisi

Makrofauna tanah melakukan *bioturbasi*, yaitu proses pencampuran lapisan tanah melalui aktivitas makan, penggalian, dan pergerakan di dalam tanah. Bioturbasi ini membantu mendistribusikan bahan organik dan nutrisi secara merata ke seluruh profil tanah, sehingga tanah menjadi lebih homogen dalam hal kandungan nutrisi. Dengan demikian, tanaman yang tumbuh di berbagai lapisan tanah dapat mengakses nutrisi dengan lebih baik, yang pada akhirnya meningkatkan kesuburan tanah secara keseluruhan.

Melalui peran-peran ini, makrofauna tanah tidak hanya membantu mempercepat perombakan bahan organik, tetapi juga berkontribusi langsung terhadap pembentukan struktur tanah yang lebih baik, peningkatan ketersediaan nutrisi, serta pengelolaan siklus air dan nutrisi yang lebih efisien. Semua proses ini berujung pada peningkatan kesuburan tanah, yang sangat penting untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan produktivitas lahan.

□ Mikroorganisme Tanah

Mikroorganisme tanah, seperti bakteri, jamur, dan protozoa, memainkan peran yang sangat penting dalam perombakan bahan organik, yang merupakan proses kritis dalam mempertahankan kesuburan tanah. Mereka tidak hanya memecah bahan organik menjadi nutrisi yang lebih sederhana tetapi juga terlibat dalam siklus nutrisi yang kompleks yang mendukung kesehatan ekosistem tanah dan pertumbuhan tanaman.

Berikut adalah penjelasan lengkap mengenai peran mikroorganisme tanah dalam perombakan bahan organik:

➤ Perombakan Bahan Organik Menjadi Nutrisi Sederhana

Mikroorganisme tanah adalah agen utama dalam proses dekomposisi bahan organik. Bahan organik, seperti sisa-sisa tumbuhan dan hewan, awalnya adalah senyawa kompleks yang sulit diurai oleh tanaman secara langsung. Mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur, memiliki enzim yang mampu memecah senyawa organik kompleks seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti glukosa dan asam amino. Proses ini penting untuk mengubah bahan organik menjadi nutrisi yang dapat diserap oleh akar tanaman.

➤ Mineralisasi Nutrisi

Setelah senyawa organik dipecah oleh mikroorganisme, nutrisi penting seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan sulfur (S) dilepaskan dalam bentuk mineral melalui proses yang dikenal sebagai mineralisasi. Proses ini mengubah nutrisi yang terikat dalam bahan organik menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap oleh tanaman. Misalnya, nitrogen dalam bentuk organik diubah menjadi amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-), yang merupakan bentuk nitrogen yang dapat digunakan oleh tanaman. Tanpa mineralisasi, nutrisi akan tetap terkunci dalam bentuk organik dan tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman.

➤ Peran Jamur dalam Dekomposisi Bahan Organik Kompleks

Jamur tanah, terutama jenis saprotrofik, memiliki peran yang sangat penting dalam menguraikan bahan organik kompleks yang sulit dipecah, seperti lignin dan selulosa. Mereka menghasilkan enzim seperti ligninase dan selulase yang mampu memecah struktur molekul ini menjadi komponen yang lebih sederhana. Selain itu, jamur mikoriza membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman, membantu penyerapan nutrisi (terutama fosfor) dari tanah, sambil menerima senyawa karbon dari tanaman sebagai imbalannya. Jamur ini membantu meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi oleh tanaman.

➤ Pembentukan Humus dan Peningkatan Kapasitas Tukar Kation (KTK)

Dalam proses perombakan bahan organik, mikroorganisme tanah berperan penting dalam pembentukan humus, komponen stabil dari bahan organik yang sudah mengalami dekomposisi lanjut. Humus memiliki peran penting dalam meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah, yang merupakan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan nutrisi kepada tanaman. Tanah dengan KTK yang tinggi dapat mempertahankan nutrisi seperti kalium, kalsium, dan magnesium lebih lama, sehingga nutrisi ini tidak mudah tercuci oleh air hujan atau irigasi. Dengan demikian, humus membantu meningkatkan kesuburan tanah secara berkelanjutan.

➤ Mikroorganisme dan Pengurangan Patogen Tanah

Selain memecah bahan organik dan meningkatkan ketersediaan nutrisi, mikroorganisme tanah juga berperan dalam mengendalikan populasi patogen tanaman di tanah. Beberapa bakteri dan jamur tanah menghasilkan senyawa antimikroba yang dapat menekan pertumbuhan patogen yang berbahaya, seperti jamur penyebab penyakit akar. Selain itu, mikroorganisme tanah berkompetisi dengan patogen untuk mendapatkan ruang dan sumber daya di dalam tanah, sehingga dapat membantu mengurangi risiko serangan penyakit pada tanaman.

➤ Mikroorganisme sebagai Sumber Zat Pengatur Tumbuh

Mikroorganisme tanah, terutama bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR - *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*), dapat menghasilkan hormon tumbuh seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang mempengaruhi perkembangan akar dan pertumbuhan tanaman. Mikroorganisme ini tidak hanya memfasilitasi penyerapan nutrisi tetapi juga merangsang pertumbuhan akar lebih dalam dan lebih luas, yang memungkinkan tanaman menyerap lebih banyak air dan nutrisi dari tanah. Dengan demikian, mikroorganisme tanah membantu meningkatkan produktivitas tanaman secara keseluruhan.

➤ Peran dalam Bioremediasi Tanah

Beberapa mikroorganisme tanah juga berperan dalam bioremediasi, yaitu proses detoksifikasi atau pembersihan tanah dari zat-zat beracun, seperti logam berat, pestisida, dan polutan organik. Mikroorganisme ini mampu memetabolisme zat beracun dan mengubahnya menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Dengan demikian, tanah yang tercemar dapat dipulihkan kembali sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang sehat. Ini juga membantu dalam menjaga kesuburan tanah jangka panjang dan kesehatan ekosistem.

Secara keseluruhan, mikroorganisme tanah memiliki peran penting dalam menjaga kesuburan tanah melalui berbagai mekanisme, seperti dekomposisi bahan organik, mineralisasi, siklus nutrisi, pengendalian patogen, serta pembentukan humus. Mereka adalah elemen kunci dalam ekosistem tanah, yang bekerja di bawah permukaan untuk memastikan bahwa tanah tetap subur, produktif, dan mampu mendukung pertumbuhan tanaman dalam jangka panjang.

Mikroorganisme tanah seperti bakteri, jamur, dan protozoa memainkan peran penting dalam proses dekomposisi bahan organik dan daur ulang nutrisi. Mikroba tanah membantu mengubah senyawa organik menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Hutan yang kaya akan biodiversitas umumnya memiliki kandungan mikroorganisme yang lebih tinggi, yang berkontribusi pada kesuburan tanah.

D. Faktor Iklim dan Curah Hujan

Faktor iklim dan curah hujan memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kesuburan tanah karena mereka memengaruhi berbagai proses fisik, kimia, dan biologis yang terjadi di dalam tanah. Iklim, yang mencakup suhu, kelembapan, dan distribusi curah hujan, memainkan peran penting dalam menentukan karakteristik tanah, proses dekomposisi bahan organik, ketersediaan nutrisi, serta aktivitas mikroorganisme dan makrofauna tanah.

Berikut adalah penjelasan lengkap mengenai bagaimana iklim dan curah hujan memengaruhi kesuburan tanah:

1) Curah Hujan dan Proses Pencucian (Leaching) Nutrisi

Curah hujan yang tinggi dapat menyebabkan pencucian, yaitu proses di mana air hujan yang berlebih membawa nutrisi penting, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, jauh ke dalam lapisan tanah atau keluar dari sistem tanah, sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Nutrisi yang mudah larut, seperti nitrat, sangat rentan terhadap pencucian dalam kondisi curah hujan yang tinggi. Akibatnya, tanah yang berada di daerah dengan curah hujan tinggi cenderung kekurangan nutrisi penting, yang berujung pada penurunan kesuburan tanah.

2) Peran Suhu dalam Aktivitas Mikroorganisme

Suhu yang diatur oleh iklim sangat memengaruhi aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam dekomposisi bahan organik dan mineralisasi nutrisi. Pada suhu yang hangat (sekitar 20-30°C), aktivitas mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, cenderung lebih tinggi, yang mempercepat proses dekomposisi bahan organik menjadi nutrisi yang dapat digunakan oleh tanaman. Sebaliknya, pada suhu yang sangat rendah

(di bawah 10°C) atau sangat tinggi (di atas 35°C), aktivitas mikroorganisme melambat, sehingga dekomposisi bahan organik juga menjadi lebih lambat, yang mengurangi ketersediaan nutrisi bagi tanaman.

3) Curah Hujan dan Erosi Tanah

Curah hujan yang tinggi, terutama bila disertai dengan hujan deras, dapat menyebabkan erosi tanah. Erosi adalah proses dimana partikel-partikel tanah yang subur di lapisan atas tanah terbawa oleh aliran air permukaan, terutama di daerah dengan kemiringan tajam atau yang kurang vegetasi. Lapisan tanah atas yang hilang akibat erosi biasanya mengandung sebagian besar bahan organik dan nutrisi yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Kehilangan lapisan ini dapat sangat menurunkan kesuburan tanah dan mengakibatkan penurunan produktivitas pertanian.

4) Distribusi Curah Hujan dan Ketersediaan Air

Iklim juga mempengaruhi distribusi curah hujan sepanjang tahun, yang memengaruhi ketersediaan air bagi tanaman. Tanah yang sering menerima curah hujan yang cukup sepanjang tahun cenderung memiliki kelembapan tanah yang stabil, yang penting untuk pertumbuhan tanaman dan proses pengambilan nutrisi. Di sisi lain, daerah dengan curah hujan yang tidak teratur atau musim kering yang panjang bisa mengalami kekeringan tanah, yang mengurangi kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi dan air. Tanah yang kering juga dapat menghambat aktivitas mikroorganisme, memperlambat dekomposisi bahan organik, dan mengurangi kesuburan tanah.

5) Pengaruh Suhu pada Laju Pembentukan Humus

Suhu yang dipengaruhi oleh iklim juga berpengaruh pada laju pembentukan humus. Di daerah dengan suhu sedang hingga hangat, proses pembentukan humus dari bahan organik terjadi lebih cepat karena aktivitas mikroorganisme yang lebih intensif. Humus sangat penting untuk kesuburan tanah karena mampu meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan nutrisi. Sebaliknya, di daerah yang sangat dingin atau sangat panas, pembentukan humus cenderung lebih lambat, sehingga tanah menjadi kurang subur karena kekurangan kandungan bahan organik yang stabil.

6) Curah Hujan dan Salinitas Tanah

Di daerah yang memiliki curah hujan rendah atau iklim kering, tanah cenderung memiliki tingkat salinitas yang lebih tinggi. Ini terjadi karena penguapan yang tinggi menyebabkan akumulasi garam di permukaan tanah, sementara curah hujan yang rendah tidak cukup untuk melarutkan dan mengalirkan garam-garam ini ke lapisan tanah yang lebih dalam. Tanah dengan kadar garam yang tinggi dapat menghambat

pertumbuhan tanaman karena garam-garam tersebut mempengaruhi kemampuan akar tanaman untuk menyerap air dan nutrisi. Akibatnya, kesuburan tanah di daerah dengan curah hujan rendah bisa sangat terbatas.

7) Pengaruh Suhu dan Curah Hujan pada Kehidupan Biota Tanah

Kehidupan biota tanah, termasuk cacing tanah, serangga, dan mikroorganisme, sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim. Pada suhu dan curah hujan yang optimal, aktivitas biota tanah tinggi, yang mempercepat perombakan bahan organik dan mendukung siklus nutrisi. Namun, pada iklim ekstrem, seperti suhu yang sangat tinggi, rendah, atau curah hujan yang berlebihan atau terlalu sedikit, kehidupan biota tanah bisa terganggu. Aktivitas mereka menurun, yang berdampak pada proses dekomposisi dan mineralisasi, sehingga kesuburan tanah menurun.

8) Degradasi Bahan Organik dalam Kondisi Hujan Tinggi

Di daerah dengan curah hujan yang sangat tinggi, dekomposisi bahan organik dapat berlangsung terlalu cepat, dan humus yang terbentuk mungkin tidak stabil. Hal ini bisa terjadi karena kelebihan air di tanah menyebabkan peningkatan aktivitas mikroorganisme pengurai anaerob, yang cenderung mempercepat perombakan bahan organik secara berlebihan sehingga tidak terbentuk humus yang stabil. Tanah di daerah ini bisa menjadi miskin bahan organik yang stabil, meskipun dekomposisi bahan organik berlangsung dengan cepat, yang pada akhirnya menurunkan kualitas tanah dalam jangka panjang.

9) Kelembapan dan Kondisi Drainase Tanah

Iklim yang basah dapat menyebabkan tanah dengan drainase buruk menjadi jenuh air, menciptakan kondisi anaerob di dalam tanah. Kondisi ini mengurangi aktivitas mikroorganisme aerobik yang diperlukan untuk perombakan bahan organik dan mineralisasi nutrisi. Dalam kondisi anaerob, proses dekomposisi menjadi lebih lambat dan kurang efisien, yang menyebabkan akumulasi bahan organik yang tidak terurai sempurna. Tanah yang jenuh air juga mengurangi kemampuan akar tanaman untuk menyerap oksigen dan nutrisi, sehingga menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan kesuburan tanah.

10) Iklim dan Proses Pembentukan Tanah (Pedogenesis)

Iklim, terutama curah hujan dan suhu, mempengaruhi proses pembentukan tanah atau pedogenesis. Di daerah dengan iklim hangat dan curah hujan yang cukup, pembentukan tanah berlangsung lebih cepat karena proses pelapukan batuan dan dekomposisi bahan organik terjadi dengan lebih intensif. Namun, di daerah dengan iklim

ekstrem, seperti gurun dengan curah hujan rendah atau tundra yang sangat dingin, proses pembentukan tanah berlangsung sangat lambat. Akibatnya, tanah di daerah ini sering kali dangkal, miskin bahan organik, dan kurang subur dibandingkan dengan tanah di daerah yang memiliki iklim lebih moderat.

Dengan demikian, iklim dan curah hujan sangat mempengaruhi kesuburan tanah melalui berbagai mekanisme, mulai dari pencucian nutrisi, erosi, pengaruh suhu pada aktivitas biota tanah, hingga proses pembentukan humus dan pengelolaan air tanah. Pengelolaan kesuburan tanah yang efektif harus mempertimbangkan kondisi iklim dan distribusi curah hujan, agar proses-proses yang mendukung produktivitas tanah dapat dioptimalkan sesuai dengan kebutuhan spesifik dari ekosistem atau lahan pertanian yang bersangkutan.

Iklim dan curah hujan memengaruhi laju pelapukan batuan, pencucian nutrisi, dan aktivitas biologis dalam tanah. Curah hujan yang tinggi di hutan tropis, misalnya, dapat menyebabkan pencucian nutrisi (leaching), yang mengurangi kesuburan tanah. Namun, dalam kondisi iklim yang seimbang, curah hujan juga membantu mendukung siklus nutrisi dan distribusi bahan organik.

11) Faktor Pengelolaan Lahan dan Konservasi

Aktivitas manusia seperti deforestasi atau konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian dapat merusak kesuburan tanah hutan. Konversi lahan cenderung mengurangi bahan organik dan mikroorganisme di dalam tanah. Pengelolaan yang baik melalui reboisasi, agroforestri, atau penggunaan pupuk organik dapat membantu memulihkan kesuburan tanah.

Contoh Soal.

Soal 1: Jelaskan bagaimana mikroorganisme tanah berperan dalam proses mineralisasi nitrogen, dan apa produk akhir dari proses tersebut?

- Jawaban: Mikroorganisme tanah, seperti bakteri pengurai, memecah nitrogen organik menjadi ammonium melalui proses amonifikasi. Ammonium kemudian diubah menjadi nitrat oleh bakteri nitrifikasi, yang dapat diserap oleh tanaman.

Soal 2: Apa yang dimaksud dengan humus, dan bagaimana peranannya dalam kesuburan tanah?

- Jawaban: Humus adalah bahan organik yang sudah terdekomposisi sempurna dan tahan terhadap dekomposisi lebih lanjut. Humus berperan penting dalam mempertahankan struktur tanah, kelembapan, dan melepaskan nutrisi secara perlahan untuk diserap oleh tanaman.

BAB 7

PENURUNAN TINGKAT KESUBURAN TANAH DAN UPAYA MENGATASINYA

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan definisi dan pentingnya kesuburan tanah dalam konteks kehutanan.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kesuburan tanah.
3. Menganalisis hubungan antara kesuburan tanah dan produktivitas hutan.

A. Faktor Penyebab Turunnya Kesuburan Tanah

Penurunan tingkat kesuburan disebabkan oleh tanah kehilangan sebagian besar unsur hara. Kehilangan unsur hara bisa karena proses panen tanaman, aliran air permukaan, pelindian dan kebakaran hutan. Besar kecilnya unsur hara yang hilang dipengaruhi oleh proses panen yang dilakukan.

Air yang berada di dalam tanah berbentuk larutan. Air tersebut dapat membawa unsur hara yang berada di dalam tanah ikut terlarut dan terbawa ke mana air tersebut mengalir. Laju dan jumlah unsur hara yang terbawa ditentukan oleh jenis hara, sifat tanah, dan keadaan air di dalam tanah. Misalnya, unsur fosfor lebih sulit bergerak di dalam tanah karena pupuk P atau fosfat berkelarutan rendah dan juga ion fosfat terikat kuat oleh partikel tanah. Sementara itu, unsur N terkenal sangat mudah bergerak karena mudah larut di dalam air dan tidak terikat oleh partikel tanah. Mekanisme gerakan hara yang disebabkan oleh air disebut aliran masa.

Unsur hara juga dapat lebih mudah bergerak di dalam tanah dengan tekstur yang lebih kasar. Hal ini karena sifat tanah tersebut yang tidak mampu menahan air serta hara karena kapasitas tukar kationnya rendah. Unsur hara di dalam tanah bisa bergerak melalui fase cair. Oleh karena itu, semakin banyak air di dalam tanah, laju gerakan hara semakin meningkat.

Unsur hara yang diberikan melalui pupuk dapat terserap oleh tanaman apabila unsur tersebut berada di permukaan akar. Akar di dalam tanah dapat tumbuh memanjang sehingga dapat menemukan dan bersentuhan langsung dengan unsur hara. Akar yang menyerap unsur hara akan membuat daerah di sekitarnya menjadi kekurangan unsur hara. Hal tersebut dapat menciptakan perbedaan unsur hara dan menyebabkan pergerakan unsur hara yang berada di dalam tanah menuju ke permukaan akar.

Penurunan kesuburan tanah disebabkan oleh berbagai faktor alami dan aktivitas manusia. Berikut adalah beberapa penyebab utama penurunan kesuburan tanah, yaitu :

6. Erosi tanah

Erosi tanah, baik oleh angin maupun air, menghilangkan lapisan atas tanah yang kaya akan bahan organik dan nutrisi penting. Tanah yang tererosi kehilangan kemampuan menyerap dan menyimpan air serta nutrisi bagi tanaman. Penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi dalam tanah. Penggunaan jangka panjang dapat menurunkan kandungan bahan organik dan mikroorganisme tanah, mengurangi kesuburan tanah alami .

7. Penggundulan Hutan

Penggundulan hutan mengakibatkan hilangnya tutupan vegetasi yang berfungsi melindungi tanah dari erosi dan meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah. Proses ini juga menurunkan kadar bahan organik yang penting untuk kesuburan tanah .

8. Pencemaran tanah

Pemaran dari limbah industri, pestisida, dan logam berat dapat mengganggu mikroorganisme dalam tanah dan menyebabkan akumulasi racun yang merusak struktur serta kualitas tanah, sehingga mengurangi kemampuannya mendukung pertumbuhan tanaman .

9. Over Irigasi dan salinisasi

Irigasi yang buruk dapat menyebabkan akumulasi garam di permukaan tanah (salinisasi), terutama di lahan-lahan dengan drainase yang buruk. Tingkat garam yang tinggi mengganggu penyerapan air dan nutrisi oleh tanaman.

B. Upaya Peningkatan Kesuburan Tanah

Peningkatan kesuburan tanah hutan dibutuhkan, karena membantu pertumbuhan tanaman dalam mengurangi ketidakseimbangan kondisi tanah. Kesuburan tanah perlu dipelajari untuk mengetahui upaya untuk meningkatkan kesuburan tanah, karena peningkatan status kesuburan tanah sangat urgen.

Pengolahan tanah yang baik dan teratur dapat meningkatkan kesuburan fisik tanah. Pemupukan yang sesuai dengan unsur hara tanah dapat meningkatkan kesuburan kimiawi tanah sehingga sesuai dengan kebutuhan tanaman. Pemupukan bisa dilakukan dengan pemberian pupuk buatan dan pupuk organik. Pupuk organik lebih besar manfaatnya daripada anorganik karena selain meningkatkan kesuburan kimia, juga dapat meningkatkan kesuburan fisik dan biologi tanah.

○ Ada 6 upaya untuk meningkatkan kesuburan tanah hutan, yaitu:

1. Urgensi peningkatan status kesuburan tanah,
2. Prinsip dasar pemupukan,
3. Pengenalan beberapa jenis pupuk,
4. Teknik operasional dalam pemupukan,
5. Efek pemupukan terhadap pertumbuhan tanaman
6. Pemeliharaan kesuburan tanah tanpa pupuk anorganik.

Urgensi peningkatan status kesuburan tanah hutan karena tuntutan untuk peningkatan produktivitas tanah dengan beberapa sebab antara lain:

1. Jenis tanah ultisol di Indonesia miskin hara,
 2. Kesuburan tanah di daerah tropis tergantung vegetasi yang tumbuh di atasnya,
 3. Pada keadaan terbuka hara tanah mudah tercuci (*leaching*),
 4. Lahan di daerah tropis byk digunakan utk mendukung kehidupan manusia (perkebunan, pemukiman, dll)
 5. Kesuburan tanah di daerah tropis sangat beragam.
 6. Degradasi lahan.
 7. Kapasitas lahan sangat terbatas (luas dan kualitas),
 8. Pemanenan di HTI yg menyebabkan kehilangan unsur hara
 9. Adanya kemajuan dalam teknologi pemupukan,
 10. Kemungkinan meningkatkan potensi lahan secara menyolok,
 11. Kebutuhan pangan meningkat, sehingga kesuburan tanah penting karena lahan telah terbatas,
 12. Ancaman bencana alam yang besar mengakibatkan vegetasi di atas lahan tersingkap, sementara dituntut meningkatkan lahan pertanian yang tersisa. sehingga perlu peningkatan kemampuan vegetasi yang tersisa.
- Upaya peningkatan kesuburan tanah hutan, dapat melalui:
1. Diagnosis dan perbaikan defisiensi hara,
 2. Materi pupuk dan reaksi pupuk dalam tanah,
 3. Teknik operasional dalam pemupukan,
 4. Pengaruh sekunder dan *off side* penggunaan bahan kimia dalam hutan,
 5. Manajemen jangka pendek (intensif) dan jangka panjang dalam produktivitas tanah.

- Beberapa praktek status peningkatan kesuburan tanah hutan adalah:
 1. pemupukan di hutan tanaman,
 2. penjarangan (tidak umum).
 3. pembeeraan (*fallow period*) dalam perladangan berpindah.
- Pemupukan tidak selalu menguntungkan, karena:
 1. Salah teknis,
 2. Adanya unsur yang saling bertentangan sehingga menahan kelarutan dan ketersediaan unsur yang lain.

Meningkatkan dan memelihara kesuburan tanah tropis tantangan besar negara berkembang yakni dalam pandangan peningkatan populasi dan tuntutan Masyarakat. Akibat degradasi, perbaikan status hara tanah perlu dilakukan. Pupuk mineral biasanya mahal untuk itu perlu dipertimbangkan peningkatan kesuburan tanah tanpa pupuk mineral (anorganik). Alternatif untuk meningkatkan dan memelihara kesuburan tanah dan mengurangi risiko gangguan gizi memiliki relevansi yang tinggi.

Contoh Soal :

1. Apa faktor penyebab menurunnya kesuburan tanah ?
2. Upaya apa saja yang dilakukan untuk menekan laju penurunan kesuburan tanah ?
3. Mengapa peningkatan kesuburan tanah itu sangat urgen / penting dilakukan ?

BAB 8
DINAMIKA UNSUR HARA
DI HUTAN ALAM DAN TANAMAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan dinamika unsur hara di hutan alam dan hutan tanaman.
2. Menjelaskan peran mikroorganisme dalam proses dekomposisi serasah.
3. Menganalisis pengaruh manusia terhadap dinamika unsur hara.

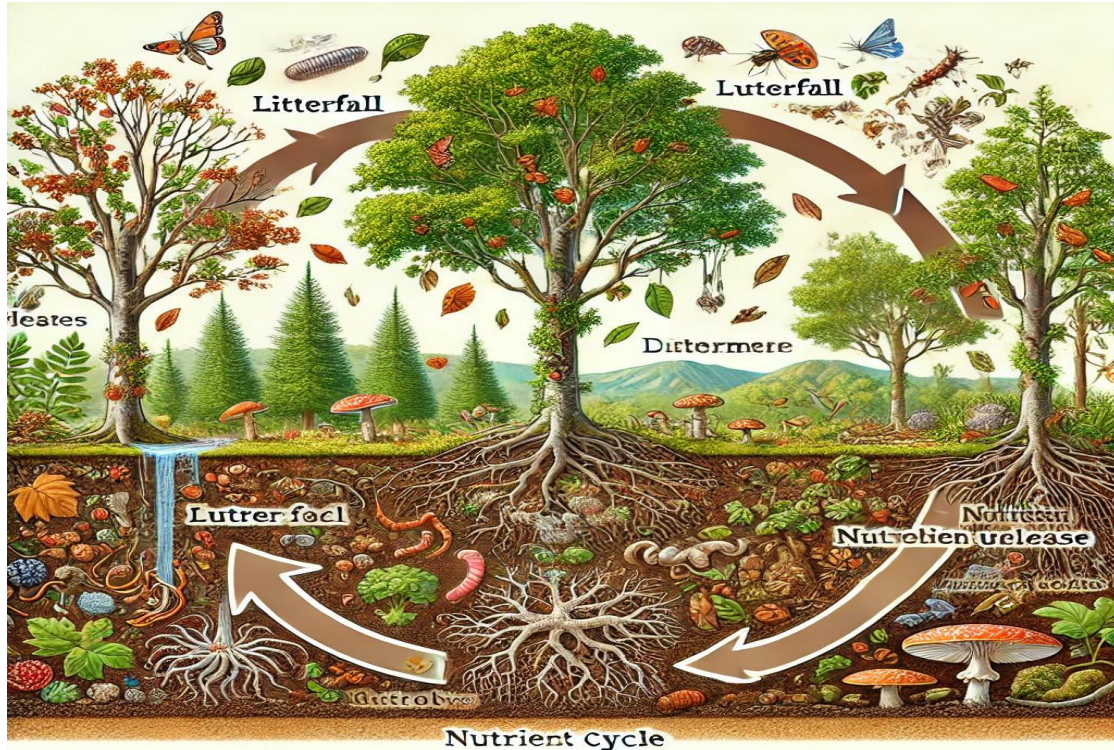
Dinamika unsur hara di hutan alam dan hutan tanaman berbeda dalam beberapa aspek penting, seperti sumber nutrisi, siklus hara, dan interaksi antara organisme. Berikut penjelasan lengkap mengenai dinamika unsur hara di kedua jenis hutan tersebut :

A. Siklus Hara di Hutan Alam :

Di hutan alam, unsur hara bersumber dari proses alami seperti dekomposisi serasah (litterfall), pelapukan batuan, dan aktivitas mikroorganisme. Nutrisi dilepaskan ke tanah melalui dekomposisi daun, ranting, dan organisme mati, kemudian diserap kembali oleh tumbuhan. Siklus ini bersifat tertutup dan seimbang karena hutan alam tidak terganggu oleh aktivitas manusia.

- Peran Mikroorganisme di Hutan Alam : Mikroorganisme tanah seperti bakteri, jamur, dan protozoa memainkan peran penting dalam mengurai bahan organik dan memfasilitasi pelepasan nutrisi di hutan alam. Mereka memastikan bahwa siklus hara berjalan lancar dengan mengubah bahan organik menjadi bentuk nutrisi yang dapat diserap oleh tanaman.
- Penyerapan Hara oleh Vegetasi di Hutan Alam : Vegetasi di hutan alam memiliki sistem akar yang dalam dan bervariasi, yang memungkinkan mereka menyerap nutrisi dari berbagai lapisan tanah. Pohon dan tanaman lainnya juga dapat membentuk hubungan simbiotik dengan jamur mikoriza, yang meningkatkan kemampuan mereka dalam menyerap nutrisi, terutama fosfor.
- Dekomposisi Serasah di Hutan Alam : Serasah di hutan alam diurai oleh mikroorganisme tanah, seperti bakteri dan jamur, yang secara bertahap melepaskan nutrisi kembali ke tanah. Proses dekomposisi ini berlangsung lambat namun stabil, sehingga nutrisi dilepaskan secara perlahan dan terus-menerus, menjaga ketersediaan hara dalam jangka panjang.
- Pengaruh Keanekaragaman Hayati di Hutan Alam : Keanekaragaman hayati yang tinggi di hutan alam berkontribusi pada dinamika hara yang lebih stabil. Spesies tanaman yang berbeda memiliki kebutuhan hara yang berbeda, sehingga tidak

ada satu nutrisi yang dieksploitasi secara berlebihan. Hal ini membantu menjaga keseimbangan hara di tanah. Siklus hara di dalam ekosisten hutan alam yang relative tertutup dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar siklus hara di hutan alam.

- ❑ Penyerapan Nutrisi oleh Tanaman.
Tumbuhan di hutan alam mengambil nutrisi dari tanah melalui akar mereka. Nutrisi ini termasuk nitrogen, fosfor, dan kalium yang penting untuk pertumbuhan tanaman.
- Litterfall (Jatuhnya Serasah).
Daun, ranting, dan bagian tanaman lainnya jatuh ke lantai hutan. Proses ini disebut serasah atau litterfall dan merupakan salah satu cara utama transfer nutrisi dari tanaman kembali ke tanah.
- Degradasi oleh Mikroorganisme.
Serasah yang jatuh diurai oleh mikroorganisme seperti bakteri dan jamur yang ada di tanah. Proses dekomposisi ini memecah bahan organik menjadi bentuk yang lebih sederhana sehingga nutrisi dapat dilepaskan kembali ke tanah.

- Peran Serangga dan Hewan Tanah.
Serangga seperti rayap, semut, dan cacing tanah memainkan peran penting dalam mempercepat proses dekomposisi dengan menghancurkan bahan organik menjadi partikel yang lebih kecil.
- Pelepasan Nutrisi.
Melalui proses dekomposisi, nutrisi yang terkandung dalam bahan organik dilepaskan ke dalam tanah dalam bentuk mineral yang dapat diserap oleh tanaman lain.
- Peran Fungi Mikoriza.
Jamur mikoriza berinteraksi dengan akar tanaman, membantu tanaman menyerap nutrisi dengan lebih efisien, khususnya fosfor. Fungi ini memperluas area penyerapan akar.
- Siklus Nitrogen.
Bakteri pengikat nitrogen di tanah mengubah nitrogen dari atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman. Nitrogen merupakan salah satu nutrisi penting yang diperlukan untuk sintesis protein.
- Siklus Karbon.
Tumbuhan mengasimilasi karbon dioksida dari atmosfer melalui fotosintesis, dan sebagian karbon ini kembali ke tanah melalui serasah dan dekomposisi.
- Retensi Air dan Kesehatan Tanah.
Siklus hara berperan penting dalam menjaga struktur tanah dan kapasitas tanah untuk menyimpan air, yang mendukung ekosistem hutan.
- Keseimbangan Ekosistem.
Siklus hara membantu menjaga keseimbangan antara produksi dan konsumsi nutrisi di hutan, memastikan tanaman memiliki sumber daya yang cukup untuk tumbuh dan berkembang.
- Gangguan Siklus oleh Aktivitas Manusia.
Deforestasi dan penggunaan pupuk kimia berlebihan dapat mengganggu siklus hara alami, menyebabkan degradasi tanah dan hilangnya keanekaragaman hayati.
- Pemulihan Siklus Hara.
Rehabilitasi hutan melalui reboisasi dan teknik konservasi tanah dapat membantu memulihkan siklus hara yang terganggu, memperbaiki fungsi ekosistem hutan.

B. Siklus Hara di Hutan Tanaman

Di hutan tanaman, siklus hara sering kali lebih sederhana dan terputus. Hutan tanaman umumnya terdiri dari satu jenis spesies (monokultur), yang mengakibatkan siklus hara bergantung pada jenis pohon yang ditanam. Praktik seperti penjarangan, penebangan, dan panen kayu menghilangkan sebagian besar biomassa, yang menyebabkan keluarnya hara dari ekosistem tanpa pengembalian yang seimbang.

➤ Peran Mikroorganisme di Hutan Tanaman:

Di hutan tanaman, mikroorganisme tanah juga berperan penting, tetapi aktivitasnya sering kali terbatas oleh praktik pengelolaan lahan. Penggunaan pupuk kimia dan pestisida dapat mengurangi keragaman mikroba tanah, yang pada gilirannya mempengaruhi kemampuan tanah untuk mendaur ulang nutrisi secara alami.

➤ Penyerapan Hara di Hutan Tanaman :

Di hutan tanaman, jenis akar dan kemampuan tanaman untuk menyerap hara sangat dipengaruhi oleh spesies yang ditanam. Tanaman monokultur sering kali memiliki sistem akar yang homogen, yang mengurangi efisiensi penyerapan hara dari berbagai lapisan tanah. Hal ini dapat menyebabkan ketergantungan pada pupuk eksternal untuk mempertahankan produktivitas.

➤ Dekomposisi di Hutan Tanaman :

Di hutan tanaman, dekomposisi sering kali dipercepat oleh iklim yang hangat dan lembap serta praktik pemanenan. Namun, penghapusan biomassa pohon yang berulang kali mengurangi jumlah serasah yang tersedia untuk diurai, sehingga siklus hara menjadi lebih tergantung pada input eksternal seperti pupuk.

➤ Keanekaragaman Rendah di Hutan Tanaman :

Hutan tanaman, terutama yang dikelola sebagai monokultur, memiliki keanekaragaman hayati yang rendah. Hal ini menyebabkan konsumsi hara yang lebih terfokus pada nutrisi tertentu yang diperlukan oleh spesies yang ditanam. Akibatnya, nutrisi tertentu cepat habis, dan tanah sering kali mengalami degradasi dalam jangka panjang.

➤ Kehilangan Hara melalui Erosi di Hutan Tanaman :

Karena praktik pengelolaan hutan tanaman seperti penebangan dan pembersihan lahan, erosi tanah sering kali menjadi masalah serius. Erosi menghilangkan lapisan tanah atas yang kaya akan hara, menyebabkan penurunan kesuburan tanah. Di hutan alam, vegetasi lebat dan sistem akar yang dalam membantu mencegah erosi, menjaga hara tetap di tempatnya.

Pengaruh Manusia terhadap dinamika hara, dimana aktivitas manusia seperti deforestasi dan konversi hutan menjadi lahan pertanian atau hutan tanaman industri, berdampak besar pada dinamika hara. Pengelolaan hutan yang tidak berkelanjutan dapat menyebabkan hilangnya nutrisi secara signifikan, baik melalui erosi, penghapusan biomassa, maupun ketergantungan pada pupuk yang dapat mencemari lingkungan.

Ada perbedaan dalam input hara, di hutan alam mendapatkan input hara dari sumber alami seperti hujan, pelapukan batuan, dan hasil dekomposisi serasah. Di sisi lain, hutan tanaman biasanya membutuhkan input tambahan seperti pupuk untuk menjaga pertumbuhan pohon yang intensif, terutama di tanah yang miskin hara.

BAB 9
PENTINGNYA MENJAGA KESEIMBANGAN
HARA DALAM EKOSISTEM

A. Menjaga Keseimbangan Hara

Keseimbangan hara dalam ekosistem sangat penting untuk menjaga kelangsungan hidup, pertumbuhan, dan produktivitas organisme yang ada di dalamnya, termasuk tanaman, hewan, dan mikroorganisme. Berikut penjelasan mendetail mengenai pentingnya keseimbangan hara dalam ekosistem:

a) Menjaga Pertumbuhan Tanaman

Nutrisi seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) sangat diperlukan oleh tanaman untuk pertumbuhan dan reproduksi. Tanpa nutrisi yang cukup, tanaman tidak dapat melakukan fotosintesis dan menghasilkan energi untuk hidup. Hal ini berdampak langsung pada produktivitas ekosistem, terutama pada ekosistem pertanian dan hutan.

Penyediaan Pangan bagi Hewan : Tanaman yang tumbuh dengan baik menjadi sumber pangan bagi hewan herbivora, yang pada gilirannya menjadi sumber makanan bagi karnivora. Dengan demikian, keseimbangan hara mempengaruhi rantai makanan dan jaring-jaring makanan di seluruh ekosistem .

b) Dekomposisi Bahan Organik

Dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme seperti bakteri dan jamur memainkan peran penting dalam siklus hara. Proses ini mengembalikan nutrisi ke dalam tanah, memungkinkan siklus hara terus berlangsung. Jika keseimbangan hara terganggu, proses dekomposisi juga dapat terganggu, menyebabkan penumpukan bahan organik yang tidak terurai .

c) Mempertahankan Struktur Kesehatan Tanah

Keseimbangan hara mempengaruhi struktur tanah. Tanah yang memiliki keseimbangan hara yang baik cenderung lebih stabil dan mampu menyimpan air lebih efektif. Ini membantu mencegah erosi dan degradasi tanah, yang penting untuk menjaga kesuburan lahan dan kesehatan ekosistem darat .

d) Pengaruh Terhadap Sumber Alam.

Keseimbangan hara yang baik membantu menjaga kualitas air di sekitar ekosistem, karena tanaman dan mikroorganisme membantu menyaring polutan. Gangguan keseimbangan hara, seperti kelebihan nitrogen atau fosfor, dapat menyebabkan eutrofikasi, yaitu pertumbuhan alga berlebihan yang mengurangi kualitas air dan mengganggu kehidupan akuatik .

e) Mengurangi Ketergantungan Pada Pupuk

Ekosistem yang seimbang secara alami mampu mendaur ulang nutrisi, sehingga mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia. Penggunaan pupuk berlebih dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air serta mengganggu keseimbangan ekosistem secara keseluruhan

f) Menjaga Keanekaragaman Hayati

Keseimbangragaman spesies dalam ekosistem. Ketika nutrisi terdistribusi dengan baik, berbagai jenis tumbuhan dan hewan dapat hidup bersama dan saling bergantung. Hilangnya keseimbangan hara dapat menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati, yang mengancam stabilitas ekosistem .

g) Menjaga Peran Ekosistem dalam Mitigasi Iklim

Ekosistem yangnagan keseimbangan hara yang baik, berperan dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon di tanah dan tanaman. Ketika hara dalam ekosistem terganggu, proses penyimpanan karbon juga terganggu, yang dapat memperburuk efek perubahan iklim .

h) Mencegah Gangguan Ekologis

Gangguan keseimbangan hara dapat menyebabkan ekosistem yang drastis, seperti invasi spesies asing yang lebih mampu beradaptasi dengan perubahan ketersediaan hara. Hal ini dapat mengganggu fungsi ekosistem asli dan menyebabkan kerusakan lingkungan yang sulit dipulihkan .

i) Mendukung Keberlanjutan Pertanian

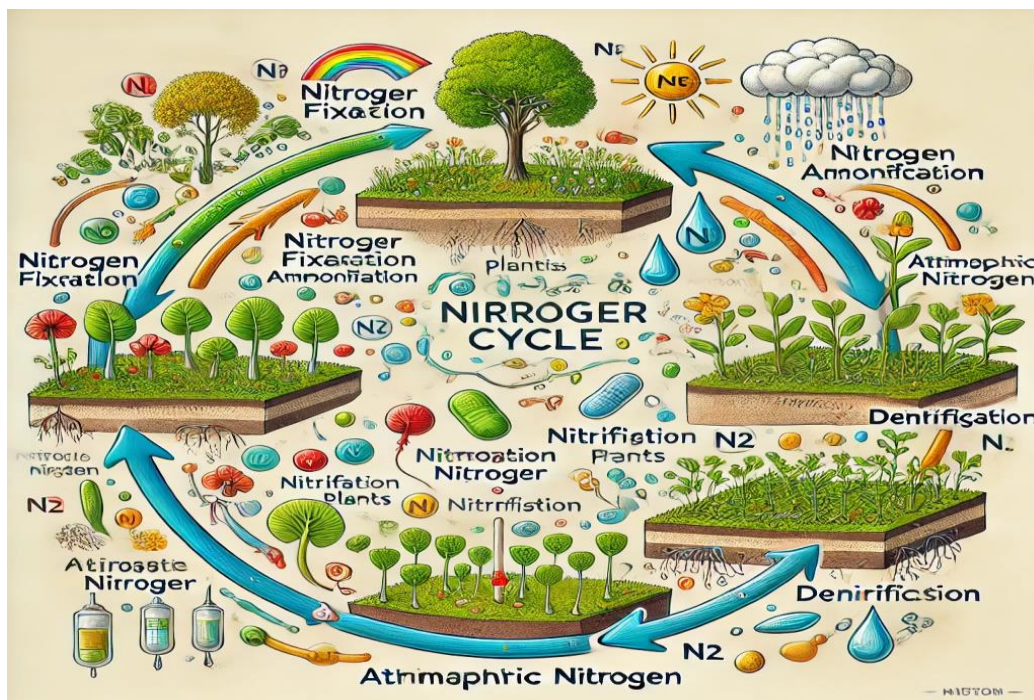
Dalam konteks pertanian berkelanjutan, menmbangan hara sangat penting untuk memastikan bahwa tanah tetap subur dalam jangka panjang. Praktik pertanian yang merusak, seperti pemupukan berlebihan atau monokultur, dapat menghabiskan hara dalam tanah, yang mempengaruhi hasil panen di masa depan .

Unsur hara tanah dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk bahan organik, mineral, dan aktivitas mikroorganisme. Bahan organik, seperti sisa-sisa tanaman dan hewan, berfungsi sebagai sumber utama unsur hara, terutama nitrogen dan fosfor. Dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme menghasilkan nutrisi yang dapat diserap oleh tanaman. Menurut Paul dan Clark (2016), aktivitas mikroba dalam tanah sangat penting untuk siklus nitrogen dan fosfor.

B. Siklus Nitrogen dan Fosfor

Proses siklus nitrogen adalah salah satu siklus biogeokimia yang paling kompleks. Nitrogen di atmosfer diubah menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman melalui proses fiksasi nitrogen, yang dilakukan oleh bakteri tertentu. Selanjutnya, nitrogen dapat diubah menjadi nitrat dan amonium melalui proses nitrifikasi. Penelitian oleh Galloway et al. (2014), menunjukkan bahwa intervensi manusia, seperti penggunaan pupuk nitrogen, telah mengubah siklus nitrogen global secara signifikan, yang berdampak pada kesuburan tanah dan kualitas air.

➤ Siklus Nitrogen (N) :



Gambar : Siklus Nitrogen

Siklus nitrogen (siklus N) adalah proses alami yang melibatkan pergerakan nitrogen melalui ekosistem, tanah, air, dan atmosfer. Nitrogen adalah elemen penting bagi makhluk hidup, terutama karena dibutuhkan untuk sintesis protein dan asam nukleat. Namun, nitrogen dalam atmosfer (N_2) tidak dapat langsung digunakan oleh sebagian besar organisme. Proses siklus nitrogen membantu mengubah nitrogen ke dalam bentuk yang dapat diambil oleh tanaman dan hewan.

➤ Peran Khusus Bakteri dalam Siklus Nitrogen

Bakteri tanah, seperti bakteri pengikat nitrogen (contohnya *Rhizobium*) dan bakteri nitrifikasi, memainkan peran kunci dalam siklus nitrogen, salah satu nutrisi makro yang paling penting bagi pertumbuhan tanaman. Bakteri pengikat nitrogen mampu mengubah nitrogen atmosfer menjadi amonia melalui proses fiksasi nitrogen, terutama dalam hubungan simbiotik dengan tanaman legum. Bakteri nitrifikasi kemudian mengoksidasi amonia menjadi nitrit (NO_2^-) dan nitrat (NO_3^-), yang mudah diserap oleh akar tanaman. Proses-proses ini memastikan bahwa nitrogen yang diperlukan tanaman selalu tersedia dalam tanah.

Berikut adalah tahap-tahap utama dalam siklus nitrogen:

1. Fiksasi Nitrogen

Fiksasi nitrogen adalah proses di mana nitrogen bebas dari atmosfer (N_2) diubah menjadi amonia (NH_3) atau nitrat (NO_3^-) yang dapat diserap oleh tanaman. Ada dua cara utama fiksasi nitrogen terjadi:

- Fiksasi biologis: Dilakukan oleh mikroorganisme tanah seperti bakteri *Rhizobium* yang hidup di akar tanaman legum. Bakteri ini mengubah nitrogen gas menjadi amonia.
- Fiksasi non-biologis: Nitrogen juga bisa difiksasi melalui proses alami seperti kilat yang menghasilkan nitrat (NO_3^-) atau melalui proses industri seperti pembuatan pupuk (proses Haber-Bosch).

2. Amonifikasi

Ketika organisme mati atau mengeluarkan limbah, nitrogen organik dalam bahan organik diubah kembali menjadi amonia (NH_3) oleh dekomposer (mikroorganisme). Proses ini disebut amonifikasi atau mineralisasi.

3. Nitrifikasi

Amonia di tanah selanjutnya dioksidasi menjadi nitrit (NO_2^-) dan kemudian nitrat (NO_3^-) oleh bakteri nitrifikasi:

- Bakteri seperti *Nitrosomonas* mengubah amonia menjadi nitrit.
- Bakteri *Nitrobacter* kemudian mengubah nitrit menjadi nitrat, yang lebih mudah diserap oleh tanaman.

4. Asimilasi

Tanaman menyerap nitrat dari tanah melalui akar mereka dan menggunakannya untuk mensintesis protein dan asam nukleat. Ketika hewan makan tanaman, mereka memperoleh nitrogen ini untuk kebutuhan metabolisme mereka.

5. Denitrifikasi

Dalam kondisi anaerobik (tanpa oksigen), bakteri denitrifikasi seperti *Pseudomonas* mengubah nitrat kembali menjadi nitrogen gas (N_2), yang kemudian dilepaskan kembali ke atmosfer. Proses ini menutup siklus nitrogen dengan mengembalikan nitrogen ke atmosfer.

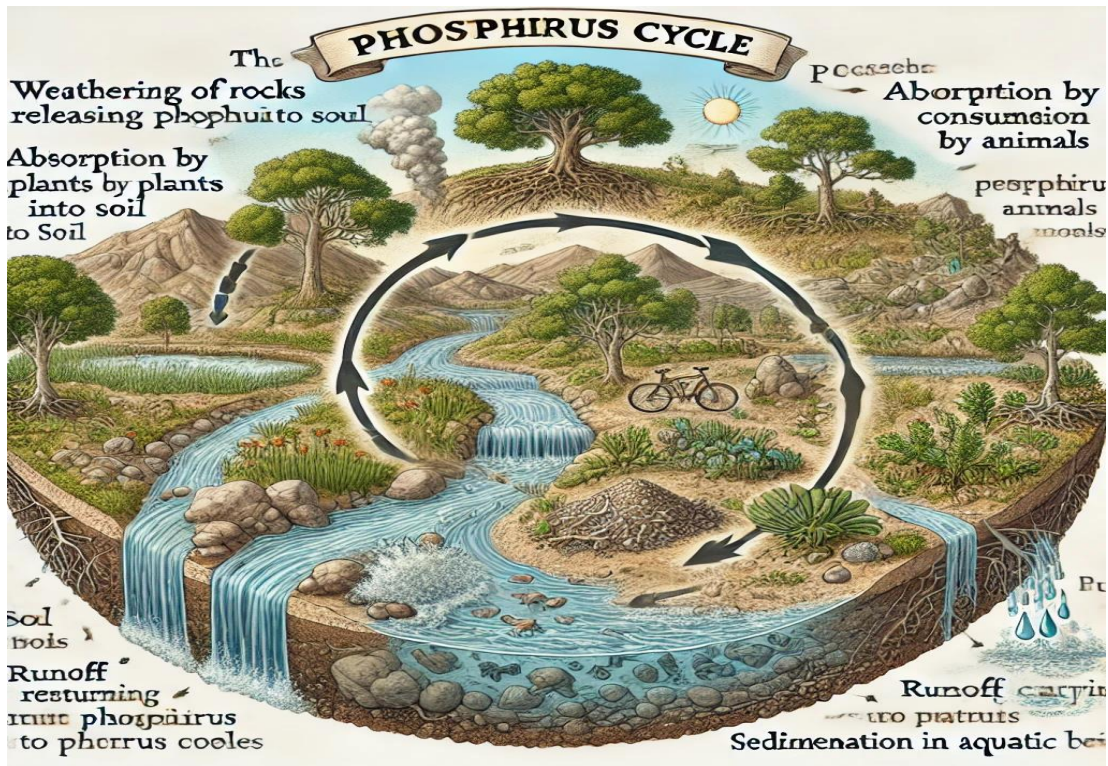
➤ Diagram Sederhana Siklus Nitrogen:

Atmosfer (N_2) → Fiksasi Nitrogen → Amonia (NH_3) → Nitrifikasi → Nitrat (NO_3^-) → Asimilasi (oleh tanaman) → Konsumsi oleh hewan → Kematian/Waste → Amonifikasi → Denitrifikasi → Atmosfer (N_2).

Proses-proses ini membantu menjaga keseimbangan nitrogen dalam ekosistem dan memastikan bahwa nitrogen tersedia dalam bentuk yang dapat digunakan oleh organisme hidup.

➤ Siklus fosfor (P)

Dalam siklus fosfor tidak melibatkan bentuk gas, tetapi lebih bergantung pada pelapukan mineral fosfat. Fosfor yang terlepas dari mineral tersebut kemudian dapat diserap oleh tanaman. Menurut Tiessen et al. (2016), tanah yang kaya akan mineral fosfat akan lebih subur, tetapi tantangan muncul ketika fosfor terikat dalam bentuk yang tidak tersedia untuk tanaman.



Gambar : Siklus Fosfor (P)

Penjelasan Proses Siklus Fosfor:

1. Pelapukan Batuan: Batuan yang mengandung fosfat mengalami pelapukan akibat faktor alam seperti hujan atau erosi, melepaskan fosfat ke dalam tanah.
2. Penyerapan oleh Tumbuhan: Fosfat di tanah diserap oleh akar tumbuhan dan digunakan dalam berbagai proses biologis seperti pembentukan DNA dan membran sel.
3. Konsumsi oleh Hewan: Hewan memperoleh fosfor dengan memakan tumbuhan. Fosfor digunakan untuk pertumbuhan dan perkembangan tulang, gigi, serta fungsi sel.
4. Penguraian: Ketika tumbuhan dan hewan mati, dekomposer seperti bakteri dan jamur menguraikan bahan organik tersebut, melepaskan fosfor kembali ke tanah.
5. Run-off: Fosfor dari tanah bisa terbawa oleh air hujan menuju sungai, danau, atau laut.
6. Sedimentasi: Di perairan, fosfor mengendap di dasar menjadi sedimen dan bisa kembali menjadi batuan setelah waktu yang lama, mengulang siklus ini.

Proses ini menjaga ketersediaan fosfor yang sangat penting untuk semua organisme, meski berbeda dari siklus nitrogen karena tidak melibatkan fase gas di atmosfer. Praktik budidaya tanaman hutan yang baik, seperti rotasi tanaman dan penggunaan pupuk organik, dapat meningkatkan siklus unsur hara dalam tanah. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana unsur hara bergerak dan terakumulasi dalam ekosistem tanah agar pengelolaan kesuburan tanah dapat dilakukan secara efektif.

BAB 10

PEMUPUKAN TANAMAN HUTAN

A. Pupuk dan Pemupukan

Pengertian pupuk dalam arti luas adalah suatu bahan yang digunakan untuk mengubah sifat fisik, kimia atau biologi tanah, sehingga menjadi lebih baik bagi pertumbuhan tanaman. Contoh : kapur, pembenah tanah (soil conditioner), urea dan guano. Pengertian pupuk secara khusus adalah suatu bahan yang mengandung satu atau lebih hara tanaman. Dengan pengertian ini hanya urea yang dianggap pupuk, karena mengandung hara tanaman, yakni nitrogen.

Pemupukan adalah usaha pemberian pupuk kedalam tanah untuk menggantikan hara yang hilang dari dalam tanah. Adapun tujuan pemupukan yaitu mengisi pembekalan zat makanan tanaman yang cukup dan memperbaiki atau memelihara keutuhan kondisi tanah dalam hal struktur.

B. Klasifikasi Pupuk dan Aplikasinya

Terdapat berbagai jenis pupuk yang dapat digunakan dalam pemupukan tanaman hutan, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangan tersendiri. Pupuk dapat dibagi menjadi dua kategori utama: pupuk organik dan pupuk anorganik. Pupuk organik, seperti kompos dan pupuk kandang, berasal dari bahan alami dan dapat meningkatkan kualitas tanah dengan menambah bahan organik. Menurut Lee et al. (2019), pupuk organik tidak hanya menyediakan nutrisi, tetapi juga meningkatkan struktur tanah dan daya retensi air.

Pupuk anorganik, di sisi lain, adalah pupuk yang diproduksi secara sintetis dan biasanya memiliki kandungan unsur hara yang lebih tinggi. Pupuk ini sering digunakan untuk memenuhi kebutuhan nutrisi spesifik tanaman. Penelitian oleh Huang et al. (2017), menunjukkan bahwa penggunaan pupuk anorganik dapat meningkatkan hasil panen tanaman hutan secara signifikan, tetapi perlu dilakukan dengan hati-hati agar tidak menyebabkan pencemaran lingkungan.

Pupuk NPK (Nitrogen, Phosphorus, Potassium) adalah salah satu jenis pupuk anorganik yang paling umum digunakan. Nitrogen penting untuk pertumbuhan daun, fosfor berperan dalam perkembangan akar, dan kalium membantu dalam pembentukan buah dan ketahanan terhadap stres. Menurut Khin et al. (2020), aplikasi pupuk NPK yang tepat dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman hutan secara signifikan.

Selain pupuk NPK, ada juga pupuk mikro yang mengandung unsur hara esensial seperti boron, mangan, dan seng. Unsur-unsur ini dibutuhkan dalam jumlah kecil tetapi sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Penelitian oleh Rojas et al. (2021) menunjukkan bahwa penambahan pupuk mikro dapat memperbaiki kualitas tanaman hutan dan meningkatkan hasil secara keseluruhan.

Penerapan pupuk harus dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi tanah dan jenis tanaman. Pengujian tanah sebelumnya sangat penting untuk menentukan jenis dan jumlah pupuk yang diperlukan. Menurut Mahmud et al. (2018), aplikasi pupuk yang tidak tepat dapat menyebabkan defisiensi atau kelebihan hara, yang keduanya dapat merugikan tanaman.

Waktu aplikasi juga mempengaruhi efektivitas pemupukan. Pemupukan sebelum masa pertumbuhan aktif tanaman, seperti awal musim hujan, dapat memberikan hasil yang lebih baik. Selain itu, teknik pemupukan, seperti pemupukan langsung ke tanah atau melalui irigasi, juga dapat memengaruhi hasil. Penelitian oleh Nor et al. (2020), menunjukkan bahwa teknik aplikasi yang tepat dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk.

Dengan memahami berbagai jenis pupuk dan aplikasinya, pengelola hutan dapat mengembangkan strategi pemupukan yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk tanaman hutan.

Berdasarkan asalnya pupuk terbagi atas pupuk alam dan pupuk buatan. Pupuk alam yakni pupuk yang terdapat di alam atau dibuat dengan bahan alami tanpa proses yang berarti. Contoh : kompos, pupuk kandang, guano, pupuk hijau dan pupuk batuan fosfat. Pupuk buatan yakni pupuk yang dibuat oleh pabrik. Contoh TSP; Urea, rustika dan nitrophoska.

Berdasarkan senyawanya, pupuk organik yakni pupuk yang berupa senyawa organik. Misalnya : pupuk kandang, kompos dan guano. Kecuali rock fosfat yang umumnya berasal dari batuan sejenis apatit $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Pupuk anorganik atau mineral, pupuk dari senyawa anorganik. Misalnya : semua pupuk buatan, seperti : urea; KCl; SP-36; Ponska; Pestisida

Kemudian berdasarkan fasanya, pupuk padat yakni pupuk yang mempunyai kelarutan beragam, mulai mudah larut sampai sukar larut air. Pupuk cair yakni pupuk berupa cairan yang cara penggunaannya dilarutkan terlebih dahulu dengan air.

Berdasarkan cara penggunaannya, pupuk daun yakni pupuk yang cara pemupukan dilarutkan terlebih dahulu dalam air, kemudian disemprotkan kepermukaan daun.

Pupuk akar yakni pupuk yang diberikan ke dalam tanah di sekitar akar agar diserap oleh akar tanaman.

Berdasarkan reaksi fisiologisnya, pupuk reaksi asam yakni pupuk yang diberikan ke dalam tanah ada kecenderungan tanah menjadi lebih asam. Misalnya : Urea dan ZA. Pupuk reaksi basa, yakni pupuk yang diberikan ke dalam tanah menyebabkan pH tanah cenderung naik (basa). Misalnya : pupuk kalsium sianida, calnitro.

Berdasarkan jumlah haranya, pupuk tunggal yakni pupuk yang mengandung satu hara tanaman. Misalnya urea dan TSP. Pupuk majemuk yakni pupuk yang mengandung dua atau lebih hara tanaman. Misalnya NPK, amophoska dan rustika.

Berdasarkan macam hara tanaman, pupuk makro yakni pupuk yang mengandung hara makro saja. Misalnya NPK dan gandasil. Pupuk mikro, yakni pupuk yang hanya mengandung hara mikro saja. Misalnya mikrovit, mikroplekmdan pupuk campuran makro dan mikro, misalnya pupuk gandasil, bayfolan dan rustika. Dalam penggunaan jenis pupuk ini dicampur dan ditambahkan zat pengatur tumbuh.

Menurut cara melepaskan unsur hara, pupuk akar dibedakan pupuk cepata urai (fast release). Jika pupuk fast release ditebarkan ke tanah, dalam waktu singkat unsur hara yang ada atau terkandung langsung dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Kelemahan pupuk ini adalah terlalu cepat habis, bukan hanya karena diserap oleh tanaman tetapi juga menguap atau tercuci oleh air. Yang termasuk pupuk fast release antara lain urea, ZA dan KCL Sedangkan pupuk lambat urai (slow release) atau pupuk lepas terkendali (controlled release), pupuk ini melepaskan unsur hara yang dikandungnya sedikit demi sedikit sesuai dengan kebutuhan tanaman. Manfaat yang dirasakan dari satu kali aplikasi lebih lama bila dibandingkan dengan pupuk fast release. Mekanisme ini dapat terjadi karena unsur hara yang dikandung pupuk slow release dilindungi secara kimiawi dan mekanis. Perlindungan secara mekanis berupa pembungkus bahan pupuk dgn selaput polimer atau selaput yang mirip dengan bahan pembungkus kapsul. Contohnya, polimer coated urea dan sulfur coated urea. Perlindungan secara kimiawi dilakukan dengan cara mencampur bahan pupuk menggunakan zat kimia, shg bahan tersebut lepas secara terkendali. Contohnya Methylin urea, Urea Formaldehyde dan Isobutilidern Diurea. Pupuk jenis ini harganya sangat mahal shg hanya digunakan untuk tanaman yang bernilai ekonomis tinggi.

C. Pupuk Organik

Pupuk organik fungsinya adalah memperbaiki struktur tanah; meningkatkan daya serap tanah terhadap air; menciptakan kondisi yang baik untuk kehidupan di dalam tanah dan sumber unsur hara yang dibutuhkan tanaman.

Jenis pupuk organik diantaranya adalah :

1) Pupuk Kandang

Pupuk kandang adalah pupuk yang berasal dari kotoran hewan baik padat maupun cair. Kandungan unsur hara kotoran ternak berbeda-beda karena masing-masing ternak mempunyai sifat khas tersendiri. Kandungan unsur haranya dipengaruhi oleh jenis ternak, makanan dan usia ternak.

2) [Kompos](#)

Kompos adalah pupuk yang berasal dari pelapukan bahan-bahan berupa dedaunan, jerami, alang-alang, rumput, kotoran hewan, sampah kota, dll. Proses pelapukan kompos dapat dipercepat melalui bantuan manusia. Pengomposan berarti merangsang perkembangan bakteri (jasad renik) untuk menguraikan bahan-bahan yang dikomposkan agar terurai menjadi senyawa lain. Dalam proses penguraian tersebut mengubah unsur hara yang terikat dalam senyawa organik sukar larut menjadi senyawa organik larut (tersedia) sehingga langsung bisa diserap tanaman.

Pengomposan juga bertujuan menurunkan rasio C/N. Jika bahan organik yang memiliki rasio C/N tinggi tidak dikomposkan dan langsung diberikan ke dalam tanah maka proses penguraiannya akan terjadi di tanah, mengakibatkan CO₂ dalam tanah meningkat sehingga mengganggu pertumbuhan tanaman, bahkan pada tanah ringan mengakibatkan daya ikat terhadap air rendah serta struktur tanahnya berserat dan kasar.

3) [Pupuk Hijau](#)

Pupuk hijau adalah pupuk yang berasal dari tanaman (hijauan) meliputi bagian daun, tangkai dan batang muda tanaman tertentu yang banyak mengandung unsur Nitrogen. Tanaman yang dikategorikan pupuk hijau mempunyai bakteri rhizobium yang menempel pada akar, terutama pada tanaman famili Leguminosae. Perlu diperhatikan [cara aplikasinya](#) untuk hasil yang lebih baik.

4) Humus

Humus adalah sisa tumbuhan berupa daun, akar, cabang dan batang yang sudah membusuk secara alami lewat bantuan mikroorganisme dan cuaca. Sifat humus tidak berbeda dari kompos yaitu mudah mengikat air dan gembur. Ciri khas humus berwarna hitam sampai coklat tua. Cara menambahkan humus ke dalam tanah adalah dengan

membenamkan tanaman hijau ke dalam tanah sehingga akan terjadi pembusukan yang membentuk humus.

Humus memiliki kontribusi terbesar terhadap keberlanjutan dan kesuburan tanah. Humus merupakan sumber makanan bagi tanaman dan akan berperan baik bagi pembentukan dan menjaga struktur tanah. Senyawa humus juga berperan dengan sangat memuaskan terutama dalam pengikatan bahan kimia toksik dalam tanah dan air. Humus mempunyai peranan sebagai berikut :

- dapat meningkatkan kapasitas kandungan air tanah,
- membantu dalam menahan pupuk anorganik larut air,
- mencegah penggerusan tanah dan menaikkan aerasi tanah,
- menaikkan fotokimia dekomposisi pestisida atau senyawa-senyawa organik toksik.

Maka sudah selanjutnya pupuk-pupuk organik yang kaya akan humus ini menggantikan peran dari pupuk-pupuk sintesis kimia dalam menjaga kualitas tanah. Humus mengandung 2 jenis zat/komponen yaitu zat non humat dan zat humat. Zat humat terdiri dari 3 bahan, yaitu asam humat, asam fulvat, dan humin. Ketiga komponen penyusun humus di atas dibedakan berdasarkan kelarutannya dalam asam kuat dan basa kuat. Asam fulvat bersifat larut baik dalam Basa Kuat maupun dalam asam kuat (warna larutannya coklat kekuning-kuningan sampai kuning cerah). Asam humat hanya larut dalam basa kuat dan tidak larut dalam asam kuat (coklat gelap sampai abu-abu hitam). Asam humin tidak larut baik dalam basa kuat maupun dalam asam kuat (warna hitam pekat).

➤ Manfaat asam humat adalah:

- 1). Memiliki kapasitas tukar kation yang tinggi. Peningkatan tersebut menambah kemampuan tanah untuk menahan unsur-unsur hara. Asam humat membentuk kompleks dengan unsur mikro sehingga melindungi unsur tersebut dari pencucian oleh air hujan.
- 2). Memiliki kemampuan penyerapan air sekitar 80-90% sehingga mengurangi resiko erosi pada tanah dan meningkatkan kemampuan tanah menahan air.
- 3). Berkemampuan mengikat dan mengendapkan polutan seperti logam berat di dalam tanah sehingga mengurangi kadar racun tanah.
- 4). Meningkatkan masukan (uptake) nutrient melalui konversi hara menjadi bentuk ketersediaan.
- 5). Meningkatkan permeabilitas membran tanaman.

- 6). Mengikat dan mengatur pelepasan hara sesuai kebutuhan tanaman sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan.
- 7). Memperbaiki struktur tanah secara fisik maupun kimia sehingga terbentuk tanah yang lebih gembur berstruktur remah dan lebih ringan. Keasaman tanah juga dapat dikurangi, terutama tanah yang banyak mengandung aluminium karena asam humat mengikat aluminium sebagai senyawa kompleks yang sulit larut dalam air sehingga tidak dapat terhidrolisis.
- 8). Menstimulasi aktifitas mikrobiologi tanah sehingga meningkatkan pertumbuhan akar tanaman. Meningkatkan aerasi tanah akibat dari bertambahnya pori tanah dari pembentukan agregat.
- 9). Menciptakan situasi tanah yang kondusif untuk menstimulasi perkembangan mikroorganisme tanah yang berfungsi dalam proses dekomposisi yang menghasilkan humus (humifikasi).
- 10). Aktivitas mikroorganisme di atas tanah akan menghasilkan hormon-hormon pertumbuhan seperti auxin, sitokinin, dan giberillin.

➤ Manfaat asam fulvat adalah :

- 1). Membantu sejumlah aktivitas kimia seperti produksi enzim, struktur hormon dan kebutuhan dalam penggunaan vitamin.
- 2). Meningkatkan pertumbuhan tanaman, perbaikan kesuburan tanah, dapat menyerap logam berat dan racun polutan serta dapat membantu memperbaiki ketidakseimbangan sel.

➤ Sifat-sifat penting Asam Humat dan Asam Fulvat

Beberapa sifat penting lain dari Asam Humat dan Asam Fulvat yang berhubungan dengan perannya dalam memperbaiki kondisi tanah dan pertumbuhan tanaman adalah sebagai berikut ;

- 1). Kapasitas Tukar Kation (Cation Exchange Capacity) yang tinggi,
- 2). Memiliki kemampuan mengikat air (Water Holding Capacity) yang besar,
- 3). Memiliki sifat absorpsi,
- 4). Sebagai zat pengompleks (Chelating/Complexing Agent), dan
- 5). Kemampuan untuk mengikat (fiksasi) polutan dalam tanah.

o Peran Asam Humat dan Asam Fulvat adalah :

Asam humat dan asam fulvat memiliki peran yang sangat penting bagi tanah dan pertumbuhan tanaman. Beberapa peran penting kedua asam tersebut adalah sebagai berikut :

- 1). Berperan dalam melarutkan sisa-sisa pupuk kimia dalam tanah sehingga tanah akan menjadi gembur kembali (memperbaiki tanah),
- 2). Sebagai pelarut TSP / SP36,
- 3). Membantu menstabilkan pH,
- 4). Mengatur pergerakan dan penyaluran unsur hara dalam tanah,
- 5). Menciptakan lingkungan yang sesuai bagi perkembangbiakkan mikro organisme berguna bagi tanaman pada tanah,
- 6). Meningkatkan produktivitas dan kualitas tanaman pada sektor pertanian, perkebunan, dan kehutanan,
- 7). Untuk meningkatkan kesuburan tanah dan memperbaiki sifat fisika-kimia pada lahan kritis,
- 8). Mengurangi penggunaan pupuk anorganik (pupuk sintesis kimia) sehingga dapat mengurangi dampak terhadap lingkungan dan menguntungkan secara ekonomi.

➤ Cara Membuat Pupuk Organik



Gambar. Cara pembuatan pupuk organik

Berikut adalah tahapan pembuatan beberapa jenis pupuk organik serta alat dan bahan yang diperlukan:

1). Pupuk Hijau

Pupuk hijau dibuat dengan cara menimbun tanaman hijau ke dalam tanah untuk membusuk secara alami. Proses ini memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kandungan nitrogen.

- Alat dan Bahan:
 - Alat: Sekop, cangkul
 - Bahan: Tanaman leguminosae (misalnya kacang-kacangan), tanah
- Caranya :
 - Tanaman hijau ditanam dan dibiarkan tumbuh.
 - Saat tanaman hampir berbunga, bajak tanaman ke dalam tanah.
 - Biarkan tanaman membusuk di dalam tanah selama beberapa minggu sebelum menanam tanaman utama

2). Pupuk Kandang

Pupuk kandang berasal dari kotoran hewan dan sangat berguna untuk memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kandungan hara.

- Alat dan Bahan:
 - Alat: Garpu kompos, cangkul
 - Bahan: Kotoran hewan (misalnya sapi, ayam), jerami, air
- Caranya :
 - Kumpulkan kotoran hewan dan campurkan dengan jerami.
 - Tumpuk bahan di tempat teduh.
 - Aduk secara berkala selama beberapa bulan hingga membusuk dan siap digunakan

3). Pupuk Gano

Pupuk Gano adalah pupuk organik yang ditambah dengan mikroba jenis Ganoderma untuk mempercepat dekomposisi dan menambah nutrisi bagi tanah.

- Alat: Drum atau wadah besar, pengaduk
- Bahan: Kotoran hewan, serbuk gergaji, mikroba Ganoderma, air
- Cara:
 - Campurkan kotoran hewan dengan serbuk gergaji.
 - Tambahkan air dan mikroba Ganoderma.
 - Aduk dan tutup wadah, diamkan selama 3–4 minggu

5). Pupuk Batuan Fosfat

Pupuk batuan fosfat berasal dari batuan alami yang mengandung fosfor. Pupuk ini membantu meningkatkan kandungan fosfor di tanah, penting untuk pembentukan bunga dan buah.

- Alat dan Bahan:
 - Alat: Penghancur batu, sekop
 - Bahan: Batuan fosfat, air
- Cara:
 - Hancurkan batuan fosfat hingga halus.
 - Sebarkan di sekitar tanaman atau campur dengan tanah.
 - Pupuk ini bekerja lambat, jadi biasanya diaplikasikan sebelum musim tanam

Semua jenis pupuk ini memiliki manfaat berbeda dan cocok untuk berbagai jenis tanaman, tergantung kebutuhan hara tanah dan tanaman yang ingin ditanam.

6). Pupuk Guano

Pupuk guano berasal dari kotoran burung laut atau kelelawar yang kaya akan nitrogen, fosfor, dan kalium, sehingga baik untuk menyuburkan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman.

- Alat dan Bahan:
 - Alat: Sekop, wadah atau kantong penyimpanan
 - Bahan: Kotoran burung laut atau kelelawar (guano), air, tanah
- Caranya :
 - Pengumpulan Guano: Kumpulkan kotoran burung atau kelelawar dari gua atau wilayah tempat mereka tinggal. Pastikan menggunakan perlengkapan pelindung karena guano dapat mengandung bakteri atau jamur.
 - Pengeringan: Setelah dikumpulkan, keringkan guano di bawah sinar matahari untuk mengurangi kadar air.
 - Penghalusan: Guano yang sudah kering bisa dihaluskan untuk memudahkan aplikasi di lahan pertanian.
 - Pencampuran dengan Tanah: Campurkan guano yang sudah dihaluskan dengan tanah atau kompos untuk meningkatkan efektivitasnya.
 - Aplikasi: Sebarkan pupuk guano di sekitar tanaman sesuai kebutuhan. Karena kandungannya yang kaya, guano sebaiknya digunakan dalam jumlah yang tepat untuk menghindari overdosis nutrisi

7). Pembuatan Kompos

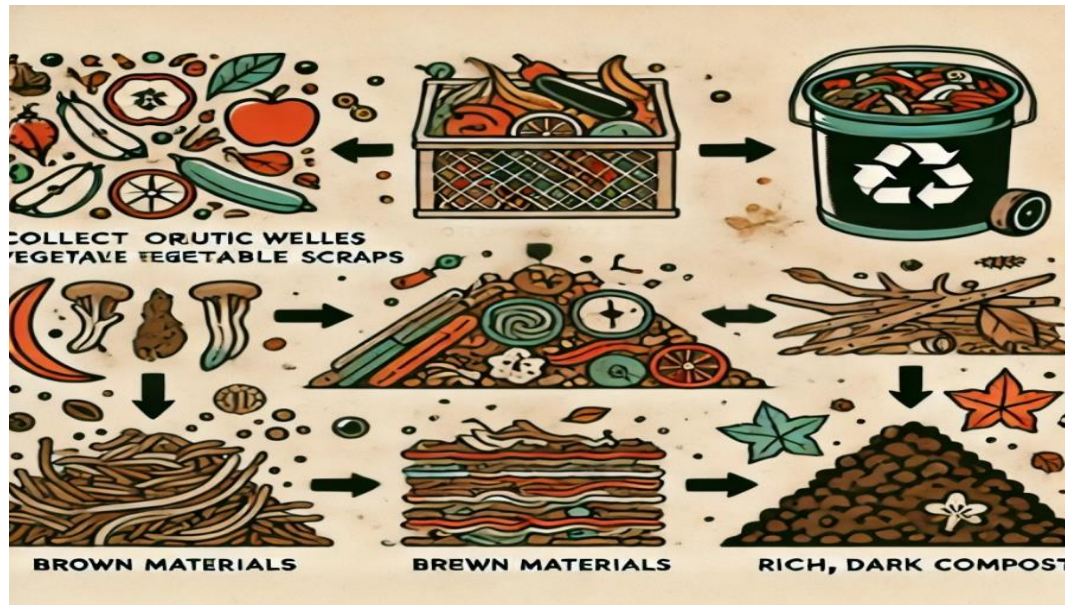
Kompos adalah pupuk organik yang dibuat dengan membusukkan sampah organik seperti sisa tanaman, sisa makanan, dan daun kering. Kompos memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kandungan unsur hara.

o Alat dan Bahan:

- Alat: Ember besar atau wadah kompos, garpu kompos, sarung tangan
- Bahan: Sampah organik (sisa makanan, daun kering), tanah, air, EM4 (bakteri pengurai opsional)

o Caranya:

- Pemilahan Sampah: Pisahkan sampah organik yang akan dijadikan kompos dari sampah non-organik. Sampah organik seperti sisa makanan, daun kering, dan sisa tanaman sangat cocok digunakan.
- Penyusunan Lapisan: Susun sampah organik dalam lapisan di dalam wadah kompos, dimulai dengan lapisan tanah atau daun kering di bagian bawah.
- Penambahan Bahan Tambahan: Tambahkan EM4 atau pupuk kandang untuk mempercepat proses dekomposisi, serta sedikit air untuk menjaga kelembaban.
- Pengadukan: Aduk kompos setiap minggu untuk memastikan udara dapat masuk dan mempercepat pembusukan bahan organik.
- Proses Pematangan: Diamkan selama 6-8 minggu hingga bahan organik membusuk sempurna dan berubah menjadi humus gelap yang gembur.
- Penggunaan: Setelah matang, kompos bisa langsung digunakan sebagai pupuk alami untuk tanaman



Gambar . Proses Pembuatan Kompos

➤ Proses pembuatan kompos adalah sebagai berikut :

1. Kumpulkan sampah organik seperti kulit buah, sisa sayuran, dan daun kering.
2. Lapiskan bahan organik dengan material coklat seperti daun kering dan ranting.
3. Mikroorganisme mulai memecah bahan-bahan tersebut selama proses dekomposisi.
4. Kompos menjadi gelap dan siap digunakan untuk memperbaiki tanah di kebun.

Proses ini memerlukan waktu beberapa minggu hingga bulan, tergantung kondisi seperti kelembapan dan temperatur.

8). Pupuk Mikroba

Pupuk mikroba adalah pupuk yang memanfaatkan inokulum-inokulum mikroba yang menguntungkan untuk sebagai dekomposer untuk mengurai bahan-bahan organik di dalam tanah, memperbaiki struktur tanah, serta melepaskan ikatan senyawa unsur hara penting bagi tanaman menjadi tersedia. Peran mikroba menjadikan unsur tersedia dapat langsung diserap oleh akar tanaman. Beberapa jenis mikroba berdasarkan fungsinya, yaitu mikroba penambat N (nitrogen), Pelarut P (Phosphat), dan mikroba selulolitik (kombinasi penambat N dan pelarut P).

Proses pembuatan pupuk mikroba sangat sederhana, ramah lingkungan, dan efektif dalam meningkatkan kesuburan tanah dan kesehatan tanaman. Pupuk hayati ini bekerja dengan cara memperbaiki struktur tanah dan menyediakan nutrisi bagi tanaman melalui aktivitas mikroba.

Berikut adalah tahapan pembuatan pupuk mikroba beserta alat dan bahan yang diperlukan, yang dikenal dengan pembuatan pupuk hayati atau mikroorganisme lokal (MOL):

Alat dan Bahan yang Dibutuhkan:

1. Bahan organik: Bisa berupa daun, jerami, kulit buah, atau limbah organik lainnya.
2. Mikroorganisme: Bakteri, fungi, dan aktinomisetes (dapat dibeli atau diperoleh dari bahan organik yang sudah terfermentasi).
3. Molase atau gula: Digunakan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme.
4. Air: Sebagai media untuk melarutkan bahan.
5. Ember besar: Untuk mencampur bahan.
6. Alat pengaduk: Bisa berupa kayu atau alat lain yang sesuai.
7. Kain atau jaring: Untuk menutupi wadah dan menjaga sirkulasi udara.

Langkah Pembuatan:

1. Persiapan Bahan Organik: Potong bahan organik (seperti daun atau jerami) menjadi potongan kecil agar lebih mudah dicerna oleh mikroorganisme.
2. Persiapan Mikroorganisme: Mikroorganisme bisa didapatkan dari bahan organik yang difermentasi selama beberapa hari, atau dari produk yang dijual di toko pertanian.
3. Persiapan Larutan Gula: Campurkan molase atau gula dengan air hingga larut sempurna. Ini berfungsi sebagai sumber energi bagi mikroorganisme.
4. Pencampuran: Campurkan bahan organik, mikroorganisme, dan larutan gula ke dalam ember. Aduk hingga merata.
5. Fermentasi: Tutup ember dengan kain atau jaring agar udara bisa masuk. Biarkan selama beberapa minggu untuk proses fermentasi. Mikroorganisme akan mengurai bahan organik menjadi pupuk hayati yang matang.
6. Penggunaan: Pupuk hayati yang sudah matang bisa digunakan sebagai pupuk tambahan untuk meningkatkan kualitas tanah dan pertumbuhan tanaman.

C. Pupuk Anorganik

Pupuk anorganik adalah jenis pupuk yang dibuat secara kimiawi dan mengandung unsur hara yang dibutuhkan tanaman, seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), dalam bentuk mineral atau garam anorganik. Pupuk ini dirancang untuk memberikan nutrisi dalam jumlah tertentu secara cepat dan efisien kepada tanaman. Biasanya, pupuk anorganik terbagi menjadi beberapa kategori utama berdasarkan kandungan unsur haranya, seperti pupuk nitrogen, pupuk fosfat, dan pupuk kalium.

❑ Pengertian dan Komposisi

Pupuk anorganik mengacu pada pupuk yang dihasilkan melalui proses industri dan umumnya mengandung konsentrasi tinggi nutrisi tertentu yang diperlukan tanaman. Berbeda dengan pupuk organik yang berasal dari bahan alami seperti kompos, pupuk kandang, atau residu tanaman, pupuk anorganik biasanya terbuat dari mineral yang diolah secara kimia. Beberapa jenis pupuk anorganik mengandung satu unsur hara utama (pupuk tunggal), sementara lainnya mengandung lebih dari satu unsur (pupuk majemuk).

Contoh: Urea (sumber nitrogen); SP-36 (sumber fosfor) dan KCl (sumber kalium).

Keunggulan penggunaan pupuk anorganik adalah :

- 1). Efisiensi Penyerapan Nutrisi : Karena kandungan nutrisinya tersedia dalam bentuk yang mudah diserap oleh tanaman, pupuk anorganik dapat memberikan efek yang cepat.
- 2). Kontrol Dosis yang Akurat : Dosis dan konsentrasi nutrisi pada pupuk anorganik dapat diatur secara presisi, memudahkan pengguna untuk menyesuaikan kebutuhan tanaman.
- 3). Harga Relatif Terjangkau : Secara umum, pupuk anorganik lebih murah dan mudah didapatkan dalam jumlah besar.

Dampak lingkungan penggunaan pupuk anorganik yang berlebihan dapat menimbulkan beberapa dampak negatif, seperti:

- Eutrofikasi : Pencemaran air akibat aliran pupuk kaya nitrogen dan fosfor ke badan air, yang dapat menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan dan mengurangi kadar oksigen di perairan.
- Degradasi Tanah : Penggunaan berlebihan pupuk anorganik dapat mengurangi kesuburan tanah dalam jangka panjang karena penurunan bahan organik dan perubahan struktur tanah.

- Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca : Pupuk nitrogen berkontribusi pada peningkatan emisi gas N₂O (nitrous oxide), yang merupakan gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global yang signifikan.

❑ Pupuk Anorganik dan Keberlanjutan Penggunaan

Meskipun efektif dalam meningkatkan hasil panen, keberlanjutan penggunaan pupuk anorganik masih menjadi tantangan dalam industri pertanian / kehutanan modern. Pendekatan penggunaan berkelanjutan mendorong integrasi penggunaan pupuk organik dan anorganik dengan pengelolaan hara yang tepat. Salah satu praktik yang disarankan adalah ****pemupukan berimbang****, di mana pupuk anorganik digunakan sesuai dengan kebutuhan tanaman berdasarkan uji tanah dan analisis kondisi tanaman.

Menurut penelitian terbaru dari **Journal of Environmental Management** (2023), kombinasi pupuk organik dan anorganik dapat meningkatkan kesehatan tanah dan efisiensi penggunaan nutrisi oleh tanaman, serta mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaan pupuk anorganik secara murni . Pendekatan ini dikenal sebagai ****Integrated Nutrient Management (INM)****, yang bertujuan untuk memaksimalkan produktivitas lahan sambil melindungi lingkungan.

Kesimpulannya bahwa pupuk anorganik memainkan peran penting dalam industry di bidang pertanian / kehutanan modern dengan menyediakan nutrisi secara efisien dan terukur. Namun, penggunaan yang bijaksana, seperti melalui pengelolaan hara berkelanjutan, sangat penting untuk mencegah dampak negatif pada lingkungan dan kesehatan tanah. Penelitian terbaru mendorong kombinasi pupuk anorganik dan organik untuk meningkatkan ketahanan sistem pertanian dalam jangka panjang.

➤ Keuntungan pemupukan anorganik dibanding pupuk organik :

1. Pemberiannya terukur, karena komposisi haranya tepat.
2. Pemberiannya sedikit karena kandungan haranya tinggi sehingga dapat menekan biaya pengangkutan.

❑ Penggunaan Pupuk di Hutan Tanaman Industri (HTI) kurang penting dibandingkan di lahan pertanian pada masa lalu karena beberapa sebab :

1. Pertumbuhan lambat dan rotasi lama.
2. Kegagalan penanaman biasanya diatasi dengan penggantian jenis.
3. Dipandang tidak ekonomis, perlu aplikasi dini, respon tidak menentu.

❑ Masa kini pemupukan di hutan tanaman industri (HTI) dianggap penting, karena beberapa hal :

1. Hutan tanaman pertumbuhan pohon cepat, kebutuhan unsur hara menjadi besar.
2. Rotasi tanaman menjadi lebih pendek sehingga pemupukan menjadi lebih ekonomis.
3. Penggunaan jenis yang terbatas (sedikit) pada lahan yang beragam memerlukan peningkatan kesuburan lahan.

❑ Sifat-sifat umum pupuk sebagai berikut:

1. Kadar unsur hara

Jumlah unsur hara menentukan kemampuannya menaikkan kadar unsur hara dlm tanah. Makin tinggi kadar unsur haranya makin baik.

2. Higroskopisitas

Mudah tidaknya pupuk menyerap uap air yang ada di udara. Pupuk yang higroskopis kurang baik, karena mudah menjadi basah atau mencair bila tidak tertutup dan bila kelembaban turun pupuk menjadi kering dan terjadi bongkah yang keras.

3. Kelarutan

Menunjukkan mudah tidaknya pupuk larut dalam air. berarti pula mudah tidaknya unsur dalam pupuk diambil tanaman. Pupuk N dan K mudah larut dalam air, sedangkan pupuk P dibedakan mudah larut dalam air (superfosfat, amophos); larut dalam asam sitrat atau ammonium sitrat netral (FMP – Fused Magnes Phosphate), dan larut dalam asam keras (fosfat alam).

4. Kemasaman

Pupuk dapat bereaksi masam, netral atau alkalis.

5. Bekerjanya

Waktu yang diperlukan hingga pupuk tersebut dapat diserap tanaman dan memperlihatkan pengaruhnya. Ada yang cepat, sedang atau lambat.

6. Salt index (indeks garam)

Pemupukan meningkatkan konsentrasi garam dalam larutan tanah.

❑ Pemupukan dilakukan, bila :

1. Tersedia air yang cukup di lapangan.
2. Kondisi iklim yang baik.
3. Gangguan hama / penyakit dapat di atasi.
4. Produksi / hasil panen rendah.

❑ Dalam pemupukan 2 hal yang penting, jika hal ini terpenuhi akan mendapatkan hasil yang optimal :

1. Unsur apa yang dibutuhkan
2. Berapa dosisnya

❑ Mengetahui kebutuhan unsur hara tanaman bisa dilakukan dengan cara :

- a. Penyelidikan gejala-gejala kekurangan unsur hara pada tanaman yang sedang tumbuh
- b. Analisis tanah
- c. Analisis jaringan tanaman
- d. Percobaan pemupukan

D. Cara Pemupukan

Cara memupuk sangat tergantung pada jenis tanaman dan kebiasaan teknik budidaya yang diterapkan. Kita tidak bisa mengetahui kebutuhan hara oleh tanaman secara tepat dan kandungan unsur hara tersedia dalam tanah. Mengetahui kebutuhan hara oleh tanaman berdasarkan pengamatan fisik, sedangkan kandungan hara tanah melalui analisis laboratorium.

Adapun cara pemupukan sebagai berikut :

1) Pemupukan Melalui Akar Tanaman

yaitu segala macam pupuk yang diberikan kepada tanaman lewat akar. Tujuannya mengisi tanah dengan hara yang dibutuhkan oleh tanaman, supaya tanaman yang ditanam di atasnya tumbuh subur dan memberikan hasil yang memuaskan.

Pemberian pupuk melalui akar dilakukan dg cara:

1) Disebar (Broad Casting)

Pupuk yang disebar merata pada tanah-tanah di sekitar tanaman atau pada waktu pembajakan/penggaruan terakhir, sehari sebelum tanam, kemudian diinjak-injak agar pupuk masuk ke dalam tanah.

- Beberapa pertimbangan pemberian pupuk melalui akar adalah:
- Tanaman ditanam pada jarak tanam yang rapat, baik teratur dalam barisan maupun tidak teratur dalam barisan.
- Tanaman mempunyai akar yang dangkal atau berada pada dekat dengan permukaan tanah.
- Tanah mempunyai kesuburan yang relatif baik.
- Pupuk yang dipakai cukup banyak atau dosis pemupukan tinggi.

- Daya larut pupuk besar, karena bila daya larutnya rendah maka yang diambil tanaman sedikit.
 - Kerugian pemupukan melalui akar :
- Merangsang pertumbuhan rumput pengganggu/gulma
- Kemungkinan pengikatan unsur hara tertentu oleh tanah lebih tinggi.

2) Ditempatkan di antara larikan/barisan

Pupuk ditaburkan diantara larikan tanaman dan kemudian ditutup kembali dengan tanah. Untuk tanaman tahunan ditaburkan melingkari tanaman dengan jarak tegak lurus daun terjauh (tajuk daun) dan ditutup kembali dengan tanah.

- Pemberian pupuk diantara larikan, dilakukan jika :
 1. Pupuk yang digunakan relatif sedikit
 2. Jarak tanam antara tanaman yang dipupuk cukup jarang dan jarak antara barisan pertanaman cukup jarang
 3. Kesuburan tanah rendah
 4. Tanaman dengan perkembangan akarnya yang sedikit
 5. Untuk tanah tegalan atau darat
 6. Bila mengkhawatirkan akan terjadi pengikatan unsur hara oleh tanah dalam jumlah yang cukup besar.

3) Ditempatkan dalam lubang

Pupuk dibenamkan ke dalam lubang di samping batang sejauh kurang lebih 10 cm dan ditutup dengan tanah. Untuk tanaman tahunan pupuk dibenamkan ke dalam lubang pupuk yang melingkari tanaman dengan jarak tegak lurus daun terjauh (tajuk daun) dan ditutup kembali dengan tanah. Cara ini dilakukan dengan pertimbangan sama dengan cara larikan/barisan.

4) Pemupukan Dengan Cara Disemprotkan Ke Daun Tanaman (Spraying)

Pupuk yang dilarutkan ke dalam air dengan konsentrasi sangat rendah kemudian disemprotkan langsung kepada daun dengan alat penyemprot biasa (Hand Sprayer). Pada hamparan yang luas dapat digunakan pesawat terbang.

Memberikan pupuk ke daun ada beberapa hal yang mutlak diketahui, yaitu konsentrasi larutan pupuk yang dibuat harus sangat rendah atau mengikuti petunjuk dalam kemasan pupuk. Jangan berlebihan, lebih baik kurang daripada berlebihan. Kalau konsentrasinya lebih rendah dari anjuran maka untuk mengimbangnya frekuensi pemupukan bisa dipercepat, misalnya dianjurkan 10 hari bisa dipercepat jadi seminggu sekali.

Pupuk daun disemprotkan ke bagian daun yang menghadap ke bawah. Hal ini disebabkan karena pada kebanyakan daun tanaman, mulut daun (stomata) umumnya menghadap ke bawah atau bagian punggung daun. Pupuk hendaknya disemprotkan ketika matahari tidak sedang terik-teriknya. Paling ideal dilakukan sore atau pagi hari persis ketika matahari belum begitu menyengat. Kalau dipaksakan juga menyemprot ketika panas, pupuk daun itu banyak menguap daripada diserap oleh daun.

Penyemprotan pupuk daun jangan dilaksanakan menjelang musim hujan. Resikonya pupuk daun akan habis tercuci oleh air hujan dan lagipula pada saat seperti itu stomata sedang menutup. Biasakanlah untuk membaca keterangan yang ada pada kemasan pupuk, karena disinilah kuncinya.

Pemberian pupuk daun bisa dilakukan bersamaan dengan pemberian pestisida kalau dianggap perlu, atau bersamaan dengan zat perangsang seperti dekamon atau atonik berikut zat pebasah. Tetapi jangan sekali-kali memberikan pupuk daun bersamaan dengan pestisida yang mengandung zat perekat, sebab pupuk tersebut akan ikut lengket di permukaan daun tanpa bisa diserap. Akibat lebih lanjut ialah pupuk akan menyerap air daun dan daunpun akan rusak seperti terbakar.

❑ Larangan menyemprot daun tanaman, yakni :

- ✓ Setelah beberapa kali penyemprotan munculah tunas baru yang akan menjadi ranting dan daun. Bila tunas telah muncul, penyemprotan dihentikan, sebab tunas muda ini amat peka terhadap pupuk. Jika tunas baru itu telah berubah menjadi ranting dan daun yang cukup kuat (tak menampakkan gejala menumbuhkan daun muda lagi), barulah tanaman boleh disemprot lagi.
- ✓ Pada saat bunga mulai mekar penyemprotan harus dihentikan, kalau tidak bunga bakal buah akan rontok semua dengan kata lain tanaman tadi akan keguguran. Ketika bunga sudah menjadi pentil, penyemprotan dengan pupuk daun boleh dilakukan lagi, dengan catatan yang disemprot bukan buahnya tetapi tetap pada daunnya
- ✓ Tanaman yang baru dipindah ke lapangan, karena tanaman itu terhitung masih muda dan lemas. Setelah tanaman mulai segar kembali atau pulih dari pengaruh pemindahan, pupuk daun bisa diberikan.

❑ Pemupukan dengan penyemprotan melalui daun dilakukan dengan pertimbangan sebagai berikut:

- 1) Unsur hara sulit diambil tanaman melalui akar tanah, misalnya tanaman yang tumbuh pada tanah berpasir atau tanah-tanah yang berbatu.
- 2) Bila unsur hara dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang sangat sedikit (unsur hara mikro).
- 3) Kondisi dan sifat fisik dari pupuk yang buruk.
- 4) Bila pemakaian pupuk dengan cara pemberian melalui akar tidak berhasil.
- 5) Pengaruh maksimum dari pupuk terhadap tanaman dapat diperoleh selama musim kering.

❑ Kelebihan pemakaian pupuk daun bila dibandingkan dengan pupuk akar yaitu:

- ✓ Pupuk daun dapat memberikan hara sesuai kebutuhan tanaman.
- ✓ Pupuk yang diberikan ke tanah tidak seluruhnya mencapai akar tanaman.
- ✓ Kelarutan pupuk daun lebih baik dibanding pupuk akar.
- ✓ Pengaruh kekurangan hara berlangsung lebih cepat dibanding pupuk akar.
- ✓ Pemberiannya dapat lebih merata.
- ✓ Kepekatannya dapat diatur sesuai pertumbuhan tanaman.

❑ Adapun kekurangan atau kelemahan dari pupuk daun yaitu:

- 1) Bila dosis pemupukannya salah maka daun akan rusak, terutama sering terjadi pada musim kering.
- 2) Tidak semua pupuk daun dapat digunakan untuk tanaman yang langsung dikonsumsi seperti sayuran atau buah berkulit tipis. Akibatnya kita harus lebih selektif memilih jenis pupuk daun yang diizinkan untuk tanaman tersebut.
- 3) Biaya yang diperlukan lebih mahal. Untuk mengaplikasikan pupuk daun memerlukan alat semprot.

F. Pentingnya Pemupukan dalam Pengelolaan Tanaman Hutan

Pemupukan adalah praktik penting dalam pengelolaan tanaman hutan yang bertujuan untuk meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Tanaman hutan, baik yang ditanam maupun yang tumbuh alami, memiliki kebutuhan nutrisi yang beragam. Dalam konteks ini, pemupukan yang tepat dapat membantu memenuhi kebutuhan tersebut dan memperbaiki kualitas tanah. Menurut Kauffman et al. (2018), pemupukan dapat meningkatkan hasil biomassa dan mempercepat pertumbuhan tanaman hutan, yang penting untuk tujuan konservasi dan produksi.

Salah satu alasan utama pemupukan adalah untuk mengatasi defisiensi unsur hara dalam tanah. Tanah yang telah terdegradasi akibat pengelolaan yang tidak berkelanjutan seringkali kekurangan nutrisi penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Penelitian oleh Sayer et al. (2017), menunjukkan bahwa pemupukan yang tepat dapat meningkatkan kualitas tanah dan mengembalikan keseimbangan hara yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman.

Pemupukan juga berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan, seperti kekeringan dan penyakit. Tanaman yang mendapatkan nutrisi yang cukup lebih mampu mengatasi tekanan dari lingkungan. Menurut Goh et al. (2018), pemupukan dapat meningkatkan daya tahan tanaman terhadap serangan hama dan penyakit, sehingga mengurangi kebutuhan akan pestisida.

Selain itu, pemupukan dapat berkontribusi pada peningkatan keanekaragaman hayati. Dengan mendukung pertumbuhan berbagai jenis tanaman hutan, pemupukan dapat menciptakan habitat yang lebih baik untuk berbagai spesies flora dan fauna. Penelitian oleh Gonzalez et al. (2020), menunjukkan bahwa pemupukan dapat meningkatkan keanekaragaman spesies dalam ekosistem hutan, yang penting untuk keberlanjutan ekosistem.

Pemupukan juga penting untuk tujuan ekonomi. Tanaman hutan yang tumbuh sehat dan cepat dapat meningkatkan hasil produksi kayu dan produk hutan lainnya. Menurut FAO (2016), pengelolaan hutan yang baik, termasuk praktik pemupukan yang tepat, dapat meningkatkan nilai ekonomi dari hutan dan membantu mendukung kehidupan masyarakat lokal.

Namun, pemupukan yang tidak tepat dapat menyebabkan masalah lingkungan, seperti pencemaran air akibat limpasan pupuk. Oleh karena itu, penting untuk merencanakan dan melaksanakan pemupukan dengan bijak. Pemupukan yang terencana dapat membantu mencapai tujuan produksi tanpa merusak lingkungan.

Dengan memahami pentingnya pemupukan dalam pengelolaan tanaman hutan, pengelola hutan dapat mengambil langkah-langkah yang diperlukan untuk menerapkan praktik yang berkelanjutan dan efektif.

BAB 11

PEMUPUKAN BERBASIS KEBUTUHAN TANAMAN

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan pentingnya pemupukan dalam pengelolaan tanaman hutan.
2. Mengidentifikasi berbagai jenis pupuk dan aplikasinya.
3. Menganalisis efek pemupukan terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman hutan.

A. Pendahuluan

Pemupukan merupakan salah satu aspek penting dalam budidaya tanaman, khususnya pada hutan tanaman industri (HTI) yang mempengaruhi produktivitas tanaman. Proses pemupukan sangat menentukan keberhasilan produksi tanaman. Dalam budidaya tanaman, keberadaan pupuk merupakan faktor yg sangat penting untuk menunjang optimalisasi produksi. Memupuk hrs benar, jika sembarangan dan tidak terukur dapat merugikan tanaman, bahkan berakibat kematian Untuk mencapai keberhasilan usaha budidaya hutan secara intensif, diperlukan pemahaman yang benar mengenai pupuk dan cara memupuk.

Pemupukan berbasis kebutuhan tanaman (site-specific nutrient management) adalah pendekatan yang didasarkan pada kondisi spesifik lahan, jenis tanaman, dan kebutuhan nutrisinya. Hal ini bertujuan untuk mengoptimalkan pemberian pupuk sesuai kebutuhan tanaman, sehingga meningkatkan hasil panen sekaligus menjaga keseimbangan nutrisi dalam tanah. Dengan pendekatan ini, efisiensi pemupukan dapat ditingkatkan dan dampak negatif terhadap lingkungan dapat diminimalkan (Zhang et al., 2021).

B. Prinsip Pemupukan Berbasis Kebutuhan Tanaman

Prinsip utama dari pemupukan berbasis kebutuhan tanaman adalah pemberian nutrisi yang tepat pada waktu yang tepat dan dalam jumlah yang sesuai. Hal ini mencakup penentuan jenis pupuk yang diperlukan, jumlah, dan frekuensi pemberiannya. Dalam pendekatan ini, analisis tanah dan tanaman menjadi elemen penting untuk mengetahui status nutrisi serta menentukan tindakan pemupukan yang sesuai. Beberapa metode yang digunakan untuk analisis ini adalah uji tanah, pemantauan kesehatan tanaman, dan teknologi sensor untuk mendeteksi kekurangan nutrisi (Ramaekers et al., 2020).

- **Kebutuhan Hara Makro dan Mikro**

Tanaman memerlukan berbagai unsur hara, yang dikategorikan sebagai unsur hara makro dan mikro. Unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) dibutuhkan dalam jumlah besar, sedangkan unsur hara mikro seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan seng (Zn) dibutuhkan dalam jumlah kecil. Masing-masing tanaman memiliki kebutuhan hara yang berbeda, dan kebutuhan tersebut dapat berubah tergantung pada fase pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, penyesuaian dosis pupuk berdasarkan fase pertumbuhan menjadi krusial untuk meningkatkan efisiensi pemupukan (Chen et al., 2019).

- **Dampak Kekurangan dan Kelebihan Pemupukan**

Kekurangan pemupukan dapat menyebabkan tanaman tidak mendapatkan nutrisi yang cukup untuk tumbuh dan berkembang optimal, sehingga menurunkan produktivitas. Sebaliknya, kelebihan pemupukan, terutama nitrogen, dapat berdampak negatif terhadap kualitas hasil tanaman dan lingkungan, misalnya pencemaran air tanah dan udara akibat leaching nitrogen dan emisi gas rumah kaca (Zhou et al., 2022). Oleh karena itu, dosis pemupukan yang tepat sangat penting untuk menghindari kerugian ekonomi dan kerusakan lingkungan.

- **Pemupukan Berdasarkan Fase Pertumbuhan**

Setiap fase pertumbuhan tanaman membutuhkan nutrisi yang berbeda. Misalnya, pada fase vegetatif awal, tanaman membutuhkan lebih banyak nitrogen untuk mendukung pertumbuhan daun dan batang. Pada fase generatif atau pembungaan dan pembentukan buah, fosfor dan kalium menjadi lebih penting. Dengan memahami kebutuhan spesifik ini, pemupukan dapat lebih disesuaikan untuk mendukung pertumbuhan optimal pada setiap tahap (Roy et al., 2020).

- **Teknologi Pemupukan Modern**

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi pemupukan cerdas berbasis sensor dan data telah berkembang pesat. Teknologi ini memungkinkan petani untuk melakukan pemupukan dengan lebih presisi. Beberapa sistem menggunakan citra satelit atau drone untuk memantau status tanaman, sehingga aplikasi pupuk bisa dilakukan secara variabel sesuai dengan kebutuhan spesifik tanaman di setiap area lahan. Teknologi ini telah terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk sekaligus menurunkan biaya dan dampak lingkungan (Singh et al., 2023).

❑ Implementasi Pemupukan Berbasis Kebutuhan Tanaman

Di lapangan, implementasi pemupukan berbasis kebutuhan tanaman memerlukan integrasi antara data tanah, kondisi tanaman, dan teknologi pemupukan. Salah satu contohnya adalah penggunaan pupuk pelepas lambat yang dapat memberikan nutrisi secara berkelanjutan kepada tanaman dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain itu, metode pemupukan berimbang (Balanced Fertilization) juga dapat diterapkan untuk memastikan tanaman mendapatkan seluruh nutrisi yang dibutuhkan dalam proporsi yang tepat (Reddy et al., 2019).

C. Teknologi dan Inovasi Dalam Pemupukan

Teknologi dan inovasi dalam pemupukan telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan meningkatnya kebutuhan untuk menghasilkan pangan secara efisien dan berkelanjutan. Dengan populasi dunia yang terus bertambah, pemupukan yang tepat menjadi kunci untuk meningkatkan produksi tanaman tanpa merusak lingkungan. Penggunaan teknologi canggih dalam pemupukan bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan pupuk, mengurangi dampak lingkungan, serta memastikan ketersediaan nutrisi yang optimal bagi tanaman.

Salah satu inovasi utama dalam pemupukan adalah pemupukan berbasis teknologi presisi atau precision farming. Dengan menggunakan teknologi GPS, drone, dan sensor tanah, petani dapat memonitor kondisi tanah dan tanaman secara real-time, sehingga dapat menyesuaikan aplikasi pupuk sesuai kebutuhan spesifik lahan. Teknologi ini memungkinkan petani mengurangi pemborosan pupuk dan menghindari penggunaan yang berlebihan, yang sering kali menyebabkan pencemaran air dan tanah akibat limpasan pupuk kimia.

Selain itu, inovasi dalam pemupukan juga melibatkan pengembangan pupuk pelepas terkendali (controlled-release fertilizers). Pupuk jenis ini dirancang untuk melepaskan nutrisi secara perlahan dan terkontrol sesuai dengan kebutuhan tanaman selama siklus pertumbuhan. Hal ini membantu mencegah kehilangan nutrisi akibat pencucian, yang sering terjadi pada pupuk konvensional. Penggunaan pupuk pelepas terkendali dapat meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi oleh tanaman sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Teknologi pemupukan berbasis mikroorganisme juga merupakan inovasi penting yang sedang dikembangkan. Penggunaan biofertilizer, atau pupuk hayati, yang mengandung mikroorganisme hidup seperti bakteri pengikat nitrogen atau fungi mikoriza, telah terbukti meningkatkan kesuburan tanah secara alami. Mikroorganisme

ini bekerja dengan cara meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman, seperti nitrogen dan fosfor, tanpa perlu penambahan pupuk kimia dalam jumlah besar. Selain itu, biofertilizer juga meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berkontribusi pada kesehatan ekosistem tanah secara keseluruhan.

Sistem fertigasi juga merupakan terobosan dalam teknologi pemupukan. Fertigasi adalah kombinasi antara irigasi dan pemupukan, di mana pupuk dilarutkan dalam air dan diaplikasikan melalui sistem irigasi tetes atau sprinkler. Metode ini memungkinkan aplikasi pupuk yang lebih merata dan efisien, serta mengurangi kehilangan nutrisi melalui pencucian. Fertigasi juga memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap dosis dan waktu aplikasi pupuk, yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik tanaman pada setiap tahap pertumbuhan.

Inovasi dalam formulasi pupuk juga penting untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pemupukan. Pengembangan pupuk organik dan pupuk berbasis limbah pertanian menjadi salah satu solusi untuk mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Pupuk organik tidak hanya menyediakan nutrisi, tetapi juga memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas tanah untuk menahan air. Selain itu, penggunaan limbah pertanian sebagai bahan baku pupuk organik membantu mengurangi limbah dan mendukung ekonomi sirkular dalam pertanian.

Penggunaan nanoteknologi dalam pemupukan merupakan inovasi terbaru yang semakin mendapatkan perhatian. Nano-fertilizer dirancang dengan partikel berukuran nano yang dapat meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman secara lebih efisien. Dengan ukuran partikel yang sangat kecil, nano-fertilizer dapat diserap lebih cepat oleh akar tanaman, sehingga meningkatkan bioavailabilitas nutrisi. Selain itu, teknologi ini juga memungkinkan kontrol pelepasan nutrisi yang lebih baik, sehingga mengurangi risiko pencemaran lingkungan.

Inovasi lainnya adalah pemupukan berdasarkan sensor cerdas dan kecerdasan buatan (AI). Sensor yang diletakkan di lahan pertanian dapat mengukur parameter penting seperti kelembaban tanah, suhu, pH, dan kandungan nutrisi. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis oleh sistem berbasis AI yang memberikan rekomendasi waktu dan jumlah pupuk yang optimal untuk aplikasi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, tetapi juga mengurangi biaya produksi dan dampak lingkungan.

Selain itu, pemupukan berbasis teknologi satelit juga mulai diterapkan di berbagai wilayah. Satelit dapat memantau kondisi lahan secara luas dan memberikan data yang

akurat tentang kondisi pertumbuhan tanaman, sehingga memungkinkan pemupukan yang lebih tepat sasaran. Dengan bantuan citra satelit, petani dapat mengidentifikasi area yang membutuhkan intervensi, seperti tambahan nutrisi, sehingga aplikasi pupuk menjadi lebih efektif dan menghemat sumber daya.

Terakhir, pentingnya inovasi dalam kebijakan dan regulasi terkait pemupukan juga tidak bisa diabaikan. Dukungan kebijakan yang mendorong adopsi teknologi pemupukan berkelanjutan, seperti insentif bagi petani untuk menggunakan teknologi presisi atau biofertilizer, dapat membantu mempercepat transisi menuju sistem pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Kolaborasi antara pemerintah, industri, dan petani sangat penting dalam menciptakan lingkungan yang kondusif bagi penerapan teknologi dan inovasi dalam pemupukan.

Dengan demikian, teknologi dan inovasi dalam pemupukan terus berkembang untuk menjawab tantangan produksi pangan berkelanjutan di masa depan. Dengan memanfaatkan teknologi canggih dan pendekatan yang lebih ramah lingkungan, pemupukan dapat dilakukan secara lebih efisien, mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem, serta meningkatkan produktivitas lahan.

Pemupukan berbasis kebutuhan tanaman menawarkan solusi berkelanjutan untuk meningkatkan hasil pertanian sekaligus menjaga kelestarian lingkungan. Dengan memanfaatkan analisis tanah dan tanaman, serta teknologi modern, petani dapat mengoptimalkan penggunaan pupuk. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan produktivitas tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem, sehingga menjadi solusi yang sangat relevan dalam menghadapi tantangan pertanian modern.

Contoh Soal:

1. Jelaskan bagaimana teknologi presisi dapat membantu meningkatkan efisiensi pemupukan dalam pertanian?
2. Apa keuntungan menggunakan pupuk pelepas terkendali dibandingkan dengan pupuk konvensional?
3. Bagaimana biofertilizer berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah secara alami?
4. Jelaskan konsep fertigasi dan manfaatnya dalam sistem pertanian modern.
5. Apa itu nano-fertilizer dan bagaimana teknologi ini meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman?
6. Apa saja alasan pentingnya pemupukan dalam pengelolaan tanaman hutan?

7. Jelaskan perbedaan antara pupuk organik dan anorganik serta aplikasi masing-masing!
8. Diskusikan teknik pemupukan yang efektif untuk tanaman hutan!

Pertanyaan:

Tanaman meranti pada fase vegetatif menunjukkan gejala kekurangan nitrogen, sedangkan pada fase generatif menunjukkan kekurangan kalium. Bagaimana strategi pemupukan berbasis kebutuhan tanaman yang tepat untuk mengatasi masalah ini?

Jawaban:

Pada fase vegetatif, tanaman meranti membutuhkan lebih banyak nitrogen untuk pertumbuhan daun dan batang. Oleh karena itu, pemberian pupuk urea atau pupuk nitrogen tinggi dapat dilakukan. Pada fase generatif, tanaman meranti memerlukan lebih banyak kalium untuk pembentukan bunga. Pupuk KCl atau pupuk kaya kalium dapat diberikan sesuai dosis yang dianjurkan setelah fase vegetatif.

BAB 12

PENGELOLAAN KESUBURAN TANAH

- **Capaian Pembelajaran**

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan praktik pengelolaan tanah berkelanjutan.
2. Mengidentifikasi jenis pupuk dan amendemen tanah serta dampaknya terhadap kesuburan.
3. Menganalisis pentingnya analisis tanah dalam pengelolaan kesuburan.

A. Praktik Pengelolaan Tanah Berkelanjutan

Pengelolaan kesuburan tanah yang berkelanjutan adalah pendekatan yang bertujuan untuk mempertahankan dan meningkatkan kualitas tanah agar dapat mendukung produktivitas pertanian dan kehutanan dalam jangka panjang. Praktik pengelolaan tanah berkelanjutan mencakup teknik-teknik seperti rotasi tanaman, penanaman penutup tanah, dan penggunaan pupuk organik. Menurut Scherr dan McNeely (2008), pengelolaan tanah berkelanjutan dapat membantu menjaga kesuburan tanah, mencegah erosi, dan meningkatkan keanekaragaman hayati.

Rotasi tanaman adalah praktik mengubah jenis tanaman yang ditanam di suatu area dari tahun ke tahun. Hal ini tidak hanya mengurangi risiko hama dan penyakit, tetapi juga membantu menjaga keseimbangan unsur hara dalam tanah. Penelitian oleh Powlson et al. (2016) menunjukkan bahwa rotasi tanaman dapat meningkatkan hasil panen dan kesehatan tanah dengan cara memperbaiki struktur tanah dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia.

Penanaman penutup tanah juga merupakan teknik yang efektif dalam menjaga kesuburan tanah. Tanaman penutup seperti legum dapat menambahkan nitrogen ke dalam tanah melalui fiksasi nitrogen. Selain itu, penanaman penutup tanah dapat membantu mencegah erosi dan kehilangan nutrisi. Menurut Teasdale et al. (2015), penggunaan tanaman penutup dapat meningkatkan kandungan bahan organik dan mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia.

Pupuk organik, termasuk kompos dan pupuk hijau, juga merupakan komponen penting dalam pengelolaan kesuburan tanah. Pupuk organik tidak hanya menyediakan nutrisi tetapi juga meningkatkan struktur tanah dan aktivitas mikroorganisme. Penelitian oleh McKenzie et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan pupuk organik dapat meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman secara signifikan.

Selain itu, penting untuk melakukan analisis tanah secara rutin untuk memahami kebutuhan nutrisi spesifik dari tanaman. Dengan mengetahui komposisi dan sifat tanah, petani dan pengelola hutan dapat merancang aplikasi pupuk yang lebih efektif dan berkelanjutan. Menurut Lal (2015), analisis tanah adalah langkah kunci dalam pengelolaan kesuburan yang efektif.

B. Penerapan Teknik Kesuburan Tanah Di Bidang Kehutanan

Penerapan teknik kesuburan tanah di bidang kehutanan merupakan komponen penting dalam mendukung keberlanjutan hutan. Tanah subur menyediakan nutrisi yang dibutuhkan oleh pohon dan tanaman lain untuk tumbuh dengan optimal. Berikut ini adalah pembahasan mengenai penerapan teknik kesuburan tanah di bidang kehutanan :

1. Pendahuluan

Kesuburan tanah di bidang kehutanan adalah salah satu faktor kunci dalam menentukan produktivitas hutan. Tanah yang subur mampu mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan, sehingga penting bagi pengelola hutan untuk mengidentifikasi dan meningkatkan kesuburan tanah. Aspek fisik, kimia, dan biologi tanah semuanya harus diperhatikan dalam penerapan teknik ini (Adams, 2019).

2. Teknik Pemanenan Terpadu

Salah satu teknik yang diterapkan dalam menjaga kesuburan tanah adalah teknik pemanenan terpadu. Teknik ini bertujuan untuk meminimalkan kerusakan tanah selama proses penebangan pohon. Sistem pemanenan yang buruk dapat mengakibatkan erosi dan penurunan kualitas tanah (Houghton et al., 2021).

3. Teknik Agroforestri

Agroforestri adalah salah satu pendekatan yang paling efektif dalam menjaga dan meningkatkan kesuburan tanah di hutan. Dengan menanam tanaman pertanian di antara pohon-pohon, teknik ini tidak hanya meningkatkan diversifikasi tanaman, tetapi juga memperbaiki siklus nutrisi tanah dan mengurangi risiko erosi (Gordon & Newman, 2022).

4. Aplikasi Kompos

Penggunaan kompos organik di lahan hutan telah terbukti membantu meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Kompos memberikan nutrisi tambahan yang dibutuhkan oleh tanaman dan meningkatkan kapasitas penyerapan air tanah, sehingga mengurangi efek kekeringan (Pires et al., 2020).

5. Teknik Pemulihan Tanah Degradasi

Pemulihan tanah yang terdegradasi sering kali memerlukan pendekatan multifaktorial, seperti penanaman tanaman penutup tanah, penggunaan biochar, dan aplikasi pupuk alami. Teknik ini bertujuan untuk mengembalikan fungsi ekologis tanah hutan yang telah terdegradasi (Smith et al., 2023).

6. Pemanfaatan Mikroorganisme Tanah

Mikroorganisme tanah seperti mikoriza dan bakteri penambat nitrogen berperan penting dalam menjaga kesehatan tanah. Aplikasi inokulan mikroorganisme dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman di lahan hutan (Williams & Johnson, 2021).

7. Teknik Pembuatan Teras

Pembuatan teras pada lahan hutan dengan topografi miring dapat mengurangi aliran air permukaan yang menyebabkan erosi. Teknik ini membantu menjaga stabilitas tanah dan mencegah hilangnya nutrisi akibat pencucian (Zhou et al., 2020).

8. Penggunaan Sistem Irigasi Berkelanjutan

Sistem irigasi tetes atau penggunaan reservoir alami dalam kawasan hutan juga membantu menjaga kelembapan tanah tanpa menyebabkan over-irigasi yang dapat mengakibatkan erosi atau pencucian nutrisi (Garcia et al., 2021).

9. Teknik Pengelolaan Lahan dengan Rotasi

Teknik rotasi tanaman atau rotasi penggunaan lahan membantu mencegah eksploitasi tanah secara berlebihan. Dengan rotasi, tanah memiliki kesempatan untuk pulih dan mengembalikan keseimbangan nutrisinya (Rodriguez & Patel, 2022).

10. Penanaman Spesies yang Adaptif

Memilih spesies tanaman yang adaptif terhadap kondisi tanah yang ada dapat membantu mempertahankan kesuburan tanah. Tanaman yang mampu beradaptasi dengan baik akan mengurangi kebutuhan terhadap input eksternal seperti pupuk (Kumar & Reddy, 2023).

11. Penggunaan Mulsa Organik

Aplikasi mulsa organik di sekitar pangkal pohon dapat mengurangi penguapan air dari tanah, mengendalikan gulma, dan menambah bahan organik ke dalam tanah seiring dengan proses dekomposisi (Perez et al., 2021).

12. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai

Pemeliharaan daerah aliran sungai (DAS) di sekitar kawasan hutan sangat penting untuk mencegah erosi. Teknik konservasi DAS yang baik akan membantu menjaga keseimbangan hidrologi dan mengurangi degradasi tanah (Hassan & Smith, 2022).

13. Teknik Pertanian Konservasi

Pertanian konservasi yang diterapkan di hutan bertujuan untuk meminimalkan gangguan tanah dan menjaga lapisan tanah bagian atas yang kaya akan nutrisi. Teknik ini melibatkan pengurangan pengolahan tanah dan penanaman tanpa olah tanah (Miller et al., 2020).

14. Manajemen Limbah Organik

Pengelolaan limbah organik dari proses kehutanan seperti sisa-sisa kayu dan daun dapat dikembalikan ke tanah sebagai sumber bahan organik. Hal ini mendukung siklus nutrisi alami tanah (Brown et al., 2022).

Penerapan teknik kesuburan tanah di bidang kehutanan sangat penting untuk menjaga kelestarian hutan dan produktivitas jangka panjangnya. Kombinasi berbagai teknik, mulai dari pemanenan terpadu hingga penggunaan mikroorganisme tanah, dapat memastikan bahwa tanah tetap subur dan mampu mendukung ekosistem hutan yang berkelanjutan.

C Kebijakan dan Praktik Berkelanjutan Dalam Pengelolaan Tanah

Pengelolaan tanah yang berkelanjutan adalah hal yang penting untuk menjaga produktivitas tanah dan kelestarian lingkungan. Seiring dengan meningkatnya tekanan pada sumber daya lahan akibat perubahan iklim, degradasi tanah, dan permintaan pangan yang terus meningkat, kebijakan dan praktik berkelanjutan dalam pengelolaan tanah menjadi semakin relevan. Pendekatan ini bertujuan untuk menjaga kesuburan tanah, mengurangi erosi, meningkatkan retensi air, dan menjaga keseimbangan ekosistem tanah, serta mendukung keberlanjutan ekonomi bagi para petani.

Salah satu komponen utama dari kebijakan pengelolaan tanah yang berkelanjutan adalah konservasi tanah dan air. Kebijakan ini mencakup tindakan seperti terasering, sistem irigasi efisien, dan pengelolaan tutupan vegetasi untuk mengurangi risiko erosi dan mempertahankan kelembaban tanah. Negara-negara seperti Indonesia telah mengadopsi kebijakan konservasi ini, terutama di wilayah pertanian lereng yang rentan terhadap erosi akibat curah hujan yang tinggi. Konservasi tanah tidak hanya melindungi

tanah dari kerusakan fisik, tetapi juga meningkatkan keberlanjutan pertanian jangka panjang.

Selain itu, kebijakan yang mendukung rehabilitasi lahan terdegradasi sangat penting dalam pengelolaan tanah yang berkelanjutan. Lahan yang mengalami degradasi, seperti akibat deforestasi, pertanian berlebihan, atau urbanisasi, memerlukan pemulihan untuk mengembalikan fungsi ekosistem tanah. Salah satu contoh praktik rehabilitasi adalah reforestasi dan penggunaan tanaman penutup tanah. Penanaman kembali pohon dan vegetasi lain dapat membantu meningkatkan kadar bahan organik tanah, meningkatkan infiltrasi air, dan mengurangi erosi. Kebijakan rehabilitasi lahan yang terstruktur membantu memperbaiki kualitas tanah dan mencegah hilangnya tanah produktif.

Praktik pertanian berkelanjutan seperti pertanian konservasi juga semakin didorong melalui kebijakan nasional dan internasional. Pertanian konservasi mencakup teknik seperti tanpa olah tanah (*no-till*), rotasi tanaman, dan penggunaan mulsa untuk melindungi tanah. Prinsip dari pertanian konservasi adalah meminimalkan gangguan tanah, memaksimalkan penggunaan tanaman penutup, dan melakukan rotasi tanaman untuk meningkatkan kesuburan tanah dan kesehatan ekosistem. Penerapan praktik ini, yang sering didukung oleh insentif kebijakan, membantu menjaga struktur tanah, mengurangi erosi, dan meningkatkan hasil pertanian jangka panjang tanpa merusak sumber daya tanah.

Kebijakan lainnya yang mendukung pengelolaan tanah berkelanjutan adalah penggunaan pupuk organik dan pengurangan pupuk kimia sintetis. Pupuk organik, seperti kompos dan pupuk hijau, membantu meningkatkan kandungan bahan organik tanah serta mendukung aktivitas biologis di dalam tanah. Kebijakan yang mendorong penggunaan pupuk organik dan biofertilizer di banyak negara bertujuan untuk mengurangi dampak negatif penggunaan pupuk kimia, seperti pencemaran air akibat limpasan pupuk nitrogen. Penggunaan pupuk organik juga sejalan dengan pendekatan pertanian organik, yang menekankan pada keseimbangan ekologis dan kesehatan tanah.

Dalam konteks kebijakan global, Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan, yang diinisiasi oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa, memberikan panduan untuk menjaga tanah sebagai bagian dari upaya mencapai target Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG). Salah satu target SDG adalah mengakhiri degradasi tanah pada tahun 2030 dan mengurangi dampak desertifikasi. Banyak negara, termasuk Indonesia, telah mengadopsi kebijakan nasional yang sejalan dengan tujuan ini, dengan fokus pada pelestarian lahan produktif dan rehabilitasi lahan yang rusak.

Kebijakan lain yang mulai diterapkan adalah pembayaran jasa lingkungan (PES - Payment for Environmental Services), di mana petani atau pemilik lahan diberikan insentif finansial untuk melestarikan dan mengelola sumber daya tanah dengan cara yang berkelanjutan. Program PES ini memotivasi petani untuk menjaga kualitas tanah melalui praktik konservasi tanah, reforestasi, atau pengelolaan air, sambil memberikan kompensasi atas kontribusi mereka terhadap pelestarian lingkungan.

Dalam pengelolaan tanah yang berkelanjutan, kerangka kebijakan yang mendukung riset dan pengembangan (R&D) sangat penting. Penelitian tentang pengelolaan tanah berkelanjutan meliputi pengembangan teknologi yang ramah lingkungan, seperti pupuk pelepas terkendali, biochar, serta sistem pertanian agroforestri. Dukungan kebijakan terhadap riset ini memungkinkan inovasi teknologi untuk diterapkan di lapangan, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan lahan sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan.

Selain kebijakan di tingkat nasional, kebijakan lokal juga memainkan peran penting dalam pengelolaan tanah yang berkelanjutan. Setiap wilayah memiliki kondisi ekologi dan sosial yang unik, sehingga kebijakan yang diterapkan harus disesuaikan dengan kebutuhan setempat. Misalnya, di daerah pegunungan yang rentan terhadap erosi, kebijakan yang mendukung penerapan terasering dan reboisasi sangat penting. Sementara itu, di wilayah pesisir yang rentan terhadap intrusi air laut, kebijakan harus fokus pada pengelolaan air dan rehabilitasi tanah dengan meningkatkan kapasitas infiltrasi.

Kebijakan yang mendukung pengelolaan tanah berkelanjutan juga memerlukan partisipasi aktif masyarakat dan petani. Pendidikan dan pelatihan tentang pentingnya pengelolaan tanah yang baik, serta penyediaan akses ke teknologi dan sumber daya, akan membantu petani menerapkan praktik yang berkelanjutan. Kebijakan yang mengedepankan pendekatan partisipatif ini sering kali lebih berhasil karena melibatkan masyarakat lokal dalam proses pengambilan keputusan dan implementasi.

Dengan demikian, kebijakan dan praktik pengelolaan tanah yang berkelanjutan memainkan peran penting dalam menjaga produktivitas pertanian dan kelestarian ekosistem. Kombinasi antara kebijakan konservasi tanah, penggunaan teknologi modern, insentif finansial, dan partisipasi masyarakat merupakan fondasi yang kuat untuk memastikan keberlanjutan pengelolaan tanah di masa depan.

D. Penggunaan Pupuk dan Amendemen Tanah

Pupuk dan amendemen tanah adalah bagian penting dari pengelolaan kesuburan tanah. Pupuk kimia dan organik memberikan unsur hara yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Pupuk kimia, seperti urea, superfosfat, dan kalium klorida, menyediakan unsur hara dalam bentuk yang mudah tersedia bagi tanaman. Namun, penggunaan pupuk kimia harus dilakukan dengan hati-hati, karena aplikasi yang berlebihan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air. Penelitian oleh Vitousek et al. (2013) menunjukkan bahwa over-aplikasi pupuk nitrogen dapat menyebabkan pencemaran nitrat di badan air.

Di sisi lain, pupuk organik, seperti kompos dan pupuk hijau, menawarkan alternatif yang lebih berkelanjutan. Pupuk organik meningkatkan kesuburan tanah secara alami dan menambah bahan organik yang sangat penting bagi kesehatan tanah. Menurut Dempsey et al. (2019), penggunaan pupuk organik dapat meningkatkan retensi air dan memperbaiki struktur tanah.

Amendemen tanah, seperti kapur untuk meningkatkan pH atau bahan organik untuk memperbaiki struktur tanah, juga berkontribusi terhadap kesuburan. Kapur, misalnya, digunakan untuk meningkatkan pH tanah yang terlalu asam, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara. Penelitian oleh Driessen et al. (2018) menunjukkan bahwa pengaplikasian kapur dapat meningkatkan produktivitas tanaman di tanah asam.

Praktik pengelolaan yang baik melibatkan pemahaman tentang kebutuhan spesifik tanaman dan kondisi tanah. Analisis tanah dan penilaian kesuburan adalah langkah penting dalam merancang program pemupukan yang tepat. Dengan memahami komposisi tanah, pengelola dapat meminimalkan penggunaan pupuk dan mencegah pencemaran.

Dampak dari penggunaan pupuk dan amendemen tanah juga perlu dipertimbangkan dalam konteks keberlanjutan. Pengelolaan yang baik akan membantu meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, sambil memastikan bahwa tanah tetap subur untuk generasi mendatang. Penelitian oleh Keesstra et al. (2018) menekankan pentingnya pendekatan holistik dalam pengelolaan kesuburan tanah yang berkelanjutan.

E. Kesuburan Tanah Dalam Pengelolaan Hutan

Kesuburan tanah merupakan faktor penting dalam pengelolaan hutan yang berkelanjutan. Tanah yang subur memungkinkan pertumbuhan vegetasi yang sehat, mendukung produktivitas hutan, dan menjaga keseimbangan ekosistem. Kesuburan

tanah ditentukan oleh beberapa faktor seperti tekstur tanah, kandungan bahan organik, serta ketersediaan unsur hara esensial bagi tanaman. Dalam konteks pengelolaan hutan, menjaga dan meningkatkan kesuburan tanah sangat penting untuk mencegah degradasi lahan dan mempertahankan produktivitas hutan jangka panjang.

Kualitas kesuburan tanah dipengaruhi oleh sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Sifat fisik tanah seperti tekstur dan struktur menentukan kemampuan tanah untuk menahan air dan menyediakan ruang bagi akar tanaman. Sifat kimia tanah, seperti pH, mempengaruhi ketersediaan unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), yang semuanya diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Sementara itu, aktivitas mikroorganisme tanah sangat berperan dalam siklus nutrisi dan pemecahan bahan organik, yang memberikan kontribusi terhadap kesuburan tanah.

Dalam pengelolaan hutan, salah satu strategi untuk meningkatkan kesuburan tanah adalah dengan menjaga kandungan bahan organik di dalam tanah. Bahan organik, seperti sisa-sisa daun, ranting, dan serasah, berfungsi sebagai sumber makanan bagi mikroorganisme tanah yang memecahnya menjadi unsur hara yang dapat diserap oleh tanaman. Selain itu, bahan organik membantu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kemampuan tanah menahan air, serta mencegah erosi.

Manajemen penggunaan pupuk dalam pengelolaan hutan juga penting untuk menjaga kesuburan tanah. Penggunaan pupuk yang tepat dapat meningkatkan kandungan unsur hara di dalam tanah tanpa merusak kualitas lingkungan. Pemilihan jenis pupuk dan metode aplikasi yang sesuai dengan kondisi tanah dan jenis vegetasi yang tumbuh di hutan dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan mencegah pencemaran lingkungan.

Selain penggunaan pupuk, rotasi tanaman atau agroforestri juga menjadi metode yang efektif dalam pengelolaan kesuburan tanah di hutan. Sistem ini memungkinkan pergantian jenis tanaman yang berbeda dalam suatu siklus, sehingga nutrisi tanah tidak terus menerus dieksploitasi oleh satu jenis tanaman saja. Agroforestri juga membantu menekan erosi tanah dan meningkatkan keanekaragaman hayati yang penting bagi stabilitas ekosistem hutan.

Tantangan utama dalam menjaga kesuburan tanah hutan adalah degradasi tanah yang disebabkan oleh praktik pertanian dan penebangan yang tidak berkelanjutan. Penebangan hutan yang berlebihan mengurangi lapisan serasah yang penting untuk melindungi tanah dari erosi dan mempertahankan kelembaban tanah. Selain itu, hilangnya vegetasi hutan menyebabkan berkurangnya kemampuan tanah untuk

menyimpan karbon, yang dapat mempercepat perubahan iklim dan berdampak negatif pada kesuburan tanah.

Pendekatan restorasi lahan menjadi solusi penting dalam mengatasi masalah degradasi tanah di hutan. Teknik seperti reboisasi, penghijauan, dan rehabilitasi lahan yang terdegradasi bertujuan untuk memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kandungan bahan organik, serta mengembalikan fungsi ekosistem tanah. Reboisasi dengan spesies tanaman asli juga membantu menjaga keseimbangan ekosistem lokal dan memperbaiki kualitas tanah dalam jangka panjang.

Pemantauan rutin terhadap kualitas kesuburan tanah merupakan langkah penting dalam pengelolaan hutan. Analisis tanah secara berkala dapat membantu mendeteksi perubahan dalam sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, serta mengidentifikasi kebutuhan intervensi manajemen yang diperlukan. Pendekatan berbasis data ini memungkinkan pengelolaan hutan yang lebih adaptif dan responsif terhadap tantangan lingkungan yang berubah.

Dengan demikian, pengelolaan kesuburan tanah dalam hutan tidak hanya bertujuan untuk menjaga produktivitas lahan, tetapi juga untuk mendukung keberlanjutan ekosistem dan mitigasi perubahan iklim. Pendekatan yang berkelanjutan dan berbasis ilmu pengetahuan sangat penting untuk menjaga fungsi ekologis hutan sekaligus memenuhi kebutuhan ekonomi dan sosial masyarakat yang bergantung pada sumber daya hutan.

F. Dampak HTI Terhadap Kesuburan Tanah

Hutan Tanaman Industri (HTI) memiliki dampak yang signifikan terhadap kesuburan tanah, terutama dalam jangka panjang. HTI umumnya ditanami dengan jenis tanaman komersial yang cepat tumbuh, seperti akasia dan eukaliptus, untuk memenuhi kebutuhan industri pulp dan kertas. Meskipun memberikan keuntungan ekonomi, dampaknya terhadap tanah seringkali kompleks dan bergantung pada praktik pengelolaannya.

- Pengurangan Kesuburan Tanah: HTI yang dikelola dengan pola monokultur sering kali menguras nutrisi tanah lebih cepat dibandingkan hutan alami. Tanaman HTI yang tumbuh cepat memerlukan banyak unsur hara, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, yang diserap dari lapisan atas tanah. Akibatnya, tanah menjadi miskin nutrisi dan memerlukan pemulihan dengan aplikasi pupuk atau rotasi tanaman yang tepat

- Peningkatan Keasaman Tanah: Jenis tanaman seperti eukaliptus diketahui dapat meningkatkan keasaman tanah. Hal ini terjadi karena tanaman tersebut menghasilkan serasah yang lebih sedikit dan memiliki senyawa kimia tertentu yang dapat menghambat proses dekomposisi, memperburuk kualitas tanah secara kimiawi dan fisik
- Degradasi Struktur Tanah: Aktivitas penanaman HTI yang intensif, termasuk penggunaan mesin berat untuk penanaman dan pemanenan, dapat menyebabkan pemadatan tanah. Tanah yang padat mengurangi kapasitas infiltrasi air, meningkatkan erosi, dan pada akhirnya menurunkan produktivitas lahan
- Penurunan Kandungan Organik: Hutan alami memberikan lapisan serasah yang kaya akan materi organik, yang penting bagi kesuburan tanah. Namun, HTI sering kali menghasilkan sedikit serasah, yang menyebabkan penurunan kandungan organik tanah dan memperlambat siklus hara alami
- Peningkatan Risiko Erosi: Penebangan dan pengelolaan yang tidak hati-hati di area HTI dapat menyebabkan peningkatan erosi tanah, terutama di lahan dengan kemiringan tinggi. Kondisi ini diperparah dengan minimnya vegetasi penutup tanah yang efektif, seperti di hutan alami
- Kehilangan Biodiversitas Tanah: Tanaman monokultur di HTI juga mempengaruhi keragaman hayati di dalam tanah. Kehadiran hanya satu jenis tanaman menyebabkan mikroba tanah yang bergantung pada variasi vegetasi menurun, yang mengganggu keseimbangan ekosistem tanah
- Perubahan Tata Air: Tanaman HTI, terutama eukaliptus, dikenal menyerap banyak air, yang dapat mengubah pola aliran air di bawah tanah. Hal ini menyebabkan pengurangan kelembaban tanah di sekitar kawasan HTI dan dapat berdampak buruk pada ekosistem sekitarnya
- Pemulihan Tanah yang Sulit: Setelah masa rotasi tanaman selesai, tanah di kawasan HTI sering kali membutuhkan waktu lama untuk pulih karena kurangnya input organik dan keausan hara yang terjadi selama penanaman
- Pengelolaan Hara yang Kurang: Pengelolaan yang tidak berkelanjutan, seperti kurangnya rotasi tanaman atau penerapan pupuk yang tidak tepat, dapat menyebabkan tanah menjadi jenuh atau kekurangan unsur hara yang esensial bagi pertumbuhan tanaman

- Solusi Pemulihan: Untuk meminimalkan dampak negatif HTI terhadap tanah, perlu diterapkan praktik-praktik konservasi, seperti penanaman vegetasi penutup tanah, rotasi tanaman, dan penggunaan pupuk organik. Pemulihan lahan setelah pemanenan juga sangat penting untuk menjaga kualitas tanah jangka panjang.

Untuk menjaga kesuburan tanah di hutan tanaman industri (HTI), diperlukan penerapan berbagai strategi pengelolaan lahan yang berkelanjutan. Berikut adalah beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk mempertahankan kesuburan tanah di HTI:

1. Pemanfaatan Bahan Organik: Penggunaan bahan organik seperti kompos atau pupuk kandang adalah salah satu cara efektif untuk meningkatkan kesuburan tanah. Bahan organik tidak hanya berfungsi sebagai sumber nutrisi, tetapi juga memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air, dan mendukung aktivitas mikroorganisme penting.
2. Rotasi Tanaman: Melakukan rotasi tanaman dengan jenis tanaman yang berbeda setiap musim dapat membantu menjaga keseimbangan nutrisi tanah. Misalnya, menanam legum (tanaman kacang-kacangan) yang mampu mengikat nitrogen di tanah setelah tanaman utama seperti pohon kayu.
3. Penanaman Tanaman Penutup: Tanaman penutup seperti legum atau rumput dapat melindungi tanah dari erosi, meningkatkan bahan organik, dan memperbaiki struktur tanah. Penanaman ini juga membantu dalam menekan pertumbuhan gulma yang dapat menguras nutrisi.
4. Pengurangan Pengolahan Tanah: Mengurangi intensitas pengolahan tanah (minimal tillage) membantu menjaga struktur tanah, mengurangi erosi, dan mempertahankan kelembaban tanah. Teknik ini juga bermanfaat untuk menjaga populasi mikroorganisme yang berperan penting dalam menyuburkan tanah.
5. Pemupukan Berimbang: Penggunaan pupuk dengan kandungan unsur hara yang sesuai dengan kebutuhan tanah dan tanaman adalah hal penting dalam menjaga kesuburan tanah di HTI. Pemupukan yang berlebihan atau salah dosis dapat menyebabkan penurunan kualitas tanah dan pencemaran lingkungan.
6. Pengendalian Erosi: Penerapan teknik konservasi tanah seperti terasering atau pemagaran untuk mencegah erosi sangat penting, terutama di wilayah dengan kemiringan yang tinggi. Erosi dapat menghilangkan lapisan tanah atas yang kaya akan nutrisi.

7. Pengelolaan Air yang Baik: Pengaturan air yang tepat, seperti irigasi yang efisien, dapat mencegah pencucian nutrisi dari tanah dan membantu menjaga kelembaban yang optimal bagi tanaman. Hal ini juga berperan dalam mencegah degradasi tanah akibat kekurangan air.
8. Pemeliharaan Mikroorganisme Tanah: Tanah yang sehat dipenuhi oleh mikroorganisme yang mendukung siklus nutrisi, seperti bakteri pengikat nitrogen dan cacing tanah. Penggunaan bahan organik dan penghindaran bahan kimia berbahaya dapat membantu mempertahankan populasi mikroorganisme ini.
9. Pengelolaan Lahan Berbasis Teknologi: Penerapan teknologi dalam pengelolaan lahan, seperti pertanian presisi, memungkinkan pemantauan dan pengelolaan nutrisi tanah secara efektif, serta meminimalkan penggunaan pupuk dan pestisida yang berlebihan.
10. Pemulihan Tanah Degradasi: Tanah yang mengalami degradasi dapat dipulihkan dengan menambahkan bahan organik dan melakukan rehabilitasi melalui penanaman kembali atau revegetasi. Langkah ini dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan produktivitas

Upaya-upaya di atas penting untuk menjaga kesuburan tanah di HTI agar dapat mendukung produktivitas jangka panjang dan mempertahankan ekosistem yang sehat.

G. Dampak Kegiatan Tambang Terhadap Kesuburan Tanah

Kegiatan tambang batubara memiliki dampak yang signifikan terhadap kesuburan tanah, baik melalui degradasi fisik, kimia, maupun biologis tanah. Beberapa dampak utama adalah sebagai berikut:

1. Erosi dan Pemasatan Tanah

Aktivitas tambang batubara sering kali melibatkan penggalian dan pengerukan yang intensif, yang menyebabkan hilangnya vegetasi alami. Hilangnya vegetasi mempercepat erosi tanah, terutama di area terbuka yang rentan terhadap aliran air hujan. Selain itu, penggunaan alat berat dalam proses tambang menyebabkan pemasatan tanah, yang menghambat penetrasi air dan akar tanaman, sehingga mengurangi kesuburan tanah.

2. Penurunan Kandungan Bahan Organik

Tanah di lokasi tambang biasanya kehilangan lapisan humusnya, yaitu lapisan yang kaya akan bahan organik yang esensial bagi kesuburan tanah. Tanpa humus, tanah menjadi miskin akan nutrisi yang diperlukan oleh tanaman untuk tumbuh. Pada lahan pasca-tambang, tingkat C-organik sering kali sangat rendah, sehingga mengurangi kapasitas tanah untuk mempertahankan unsur hara yang penting.

3. Pengasaman Tanah

Salah satu dampak kimia dari tambang batubara adalah peningkatan tingkat keasaman (pH) tanah. Penggalian material tambang mempercepat pelepasan senyawa sulfur yang dapat teroksidasi menjadi asam sulfat, sehingga mengasamkan tanah. Tanah yang asam dapat mengurangi ketersediaan hara bagi tanaman, terutama fosfor, karena unsur seperti aluminium dan besi dalam tanah asam mengikat fosfor.

4. Pencemaran Limbah Tambang

Limbah tambang batubara, baik berupa debu maupun residu kimia, dapat mencemari tanah sekitarnya. Limbah ini sering kali mengandung logam berat yang dapat terakumulasi dalam tanah, mengganggu struktur kimia tanah, dan mencemari air tanah. Pencemaran ini memperburuk kualitas tanah, membuatnya tidak layak untuk aktivitas pertanian dan vegetasi alami.

5. Penurunan Nitrogen Tanah

Nitrogen, unsur penting untuk pertumbuhan tanaman, dapat hilang dengan cepat dari tanah yang terganggu akibat aktivitas tambang. Penelitian menunjukkan bahwa tanah di area pasca-tambang sering kali memiliki tingkat nitrogen yang sangat rendah, yang disebabkan oleh hilangnya bahan organik dan pencucian unsur nitrogen oleh air hujan yang deras.

6. Ketidakseimbangan Unsur Hara

Dalam kondisi tanah yang sudah rusak akibat penambangan, keseimbangan unsur hara menjadi sangat terganggu. Selain kehilangan nitrogen, tanah pasca-tambang sering kali mengalami kekurangan fosfor, kalium, dan nutrisi esensial lainnya yang diperlukan untuk kesuburan tanaman. Ini membuat tanah tidak subur dan tidak cocok untuk pertanian tanpa intervensi pemulihan yang signifikan.

7. Gangguan Biota Tanah

Aktivitas tambang juga berdampak pada populasi mikroorganisme tanah, yang memainkan peran penting dalam siklus nutrisi tanah. Penggalian dan pemadatan tanah mengurangi keberadaan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur, yang diperlukan untuk proses dekomposisi organik dan penyediaan unsur hara bagi tanaman.

8. Perubahan Hidrologi

Tambang batubara sering kali mengganggu sistem aliran air alami, menyebabkan perubahan dalam pola hidrologi lokal. Air limpasan dari area tambang membawa sedimen dan polutan, memperburuk kualitas air tanah, serta meningkatkan risiko banjir di lahan-lahan sekitar tambang.

9. Pemulihan Pasca-Tambang

Proses rehabilitasi tanah pasca-tambang memerlukan upaya yang besar dan mahal. Rehabilitasi biasanya melibatkan penanaman ulang vegetasi, pengolahan tanah untuk meningkatkan kesuburan, dan pengelolaan aliran air. Namun, tingkat keberhasilan pemulihan ini sangat bergantung pada kondisi awal kerusakan dan upaya yang dilakukan oleh perusahaan tambang.

10. Potensi Keberlanjutan

Untuk mengurangi dampak jangka panjang, beberapa perusahaan tambang telah mencoba melakukan revegetasi di lahan bekas tambang, namun tantangan terbesar adalah memulihkan kualitas tanah agar bisa kembali digunakan untuk pertanian atau ekosistem alami. Penelitian tentang penggunaan pupuk organik dan pengayaan tanah dengan mikroorganisme telah menunjukkan beberapa hasil positif, meskipun prosesnya memakan waktu lama.

Reklamasi dan revegetasi areal bekas tambang merupakan langkah penting untuk memulihkan lahan yang telah mengalami degradasi akibat kegiatan tambang, dengan tujuan menjaga kesuburan tanah serta memulihkan ekosistem. Proses ini melibatkan berbagai teknik yang dirancang untuk memperbaiki kualitas tanah dan lingkungan.

1. Pengelolaan Top Soil: Salah satu tahapan awal adalah pengelolaan *top soil* atau lapisan tanah teratas yang kaya nutrisi. Sebelum penambangan, *top soil* diambil dan disimpan untuk digunakan kembali pada tahap akhir. Ketika revegetasi dilakukan, lapisan ini dikembalikan untuk menambah unsur hara di tanah yang direklamasi.

2. Regrading dan Penataan Lahan: Proses *regrading* membantu memperbaiki kontur tanah, menghindari erosi, dan menstabilkan tanah. Penataan kembali ini memastikan lahan dapat digunakan kembali untuk tujuan produktif, seperti pertanian atau kehutanan.
3. Revegetasi dengan Tanaman Penutup: Menanami lahan bekas tambang dengan vegetasi, seperti tanaman penutup (*cover crops*) dari jenis leguminosa, dapat meningkatkan kandungan bahan organik dan nitrogen di tanah, memperbaiki struktur tanah, dan mencegah erosi. Tanaman-tanaman ini juga membantu mengurangi kadar logam berat di tanah.
4. Fitoremediasi: Proses ini melibatkan penggunaan tanaman yang memiliki kemampuan untuk menyerap dan mengurangi polutan di dalam tanah. Tanaman yang digunakan dalam revegetasi bisa membantu menyerap logam berat dan memperbaiki kualitas air dan tanah di area tambang.
5. Penggunaan Mikroorganisme: Selain vegetasi, mikroorganisme seperti jamur dan bakteri bisa membantu meningkatkan kesuburan tanah dengan cara membantu pohon dalam menyerap fosfor dan nitrogen dari tanah bekas tambang. Hal ini dapat memperbaiki kondisi fisik dan kimia tanah.
6. Pengelolaan Air dan Drainase: Pengelolaan aliran air sangat penting untuk mencegah erosi dan pencemaran air. Pembuatan sistem drainase yang baik dan penggunaan tanaman yang mampu menyerap air berlebih dapat membantu mengurangi dampak negatif aliran air permukaan.
7. Pemberian Bahan Organik: Penambahan bahan organik, seperti kompos atau pupuk alami, sangat efektif dalam memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kandungan unsur hara. Ini juga membantu meningkatkan aktivitas mikroba di tanah yang penting untuk menjaga kesuburan.
8. Pemantauan Jangka Panjang: Setelah proses reklamasi selesai, pemantauan kondisi tanah dan vegetasi dilakukan secara berkala untuk memastikan keberhasilan reklamasi. Jika diperlukan, tindakan pemeliharaan seperti penanaman ulang dilakukan untuk mencapai hasil optimal.
9. Restorasi Ekosistem: Selain tanah, pemulihan ekosistem lokal juga menjadi bagian penting dalam reklamasi. Penanaman kembali pohon-pohon dan tanaman asli setempat membantu mengembalikan keseimbangan ekosistem, termasuk keanekaragaman hayati.

10. Komitmen dan Pengawasan: Pengawasan oleh pemerintah dan perusahaan tambang sangat penting untuk memastikan reklamasi berjalan sesuai rencana. Di Indonesia, pemerintah telah menetapkan regulasi yang ketat terkait reklamasi tambang untuk menjaga keberlanjutan lingkungan.

Dengan langkah-langkah ini, reklamasi dan revegetasi diharapkan dapat mengembalikan kesuburan tanah serta mendukung keberlanjutan lingkungan di areal bekas tambang.

Contoh Soal

1. Apa saja praktik pengelolaan tanah berkelanjutan dan manfaatnya? (10 poin)
2. Jelaskan perbedaan antara pupuk kimia dan pupuk organik! (10 poin)
3. Diskusikan peran amendemen tanah dalam meningkatkan kesuburan! (10 poin)
4. Jelaskan bagaimana tekstur dan struktur tanah mempengaruhi kesuburan tanah dalam pengelolaan hutan!
5. Mengapa kandungan bahan organik sangat penting dalam menjaga kesuburan tanah di hutan?
6. Bagaimana praktik agroforestri dapat membantu menjaga kesuburan tanah dalam ekosistem hutan?
7. Apa dampak penggunaan pupuk yang tidak tepat terhadap kesuburan tanah dan lingkungan hutan?
8. Jelaskan langkah-langkah restorasi lahan yang dapat diterapkan untuk memperbaiki tanah yang terdegradasi di kawasan hutan!
9. Jelaskan bagaimana kebijakan konservasi tanah berperan dalam menjaga kesuburan tanah di daerah pertanian lereng.
10. Apa saja praktik-praktik dalam pertanian konservasi yang dapat membantu menjaga kesehatan tanah?
11. Bagaimana kebijakan penggunaan pupuk organik dapat membantu mengurangi dampak negatif dari penggunaan pupuk kimia sintetis?
12. Jelaskan peran Program Payment for Environmental Services (PES) dalam pengelolaan tanah berkelanjutan.
13. Apa saja tantangan yang dihadapi dalam implementasi kebijakan pengelolaan tanah berkelanjutan di tingkat lokal?

BAB 13
DAMPAK PERUBAHAN IKLIM
TERHADAP KESUBURAN TANAH

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- ❑ Menjelaskan pengaruh perubahan iklim terhadap tanah.
- ❑ Mengidentifikasi strategi adaptasi dan mitigasi untuk pengelolaan tanah.
- ❑ Menganalisis pentingnya pengelolaan tanah dalam konteks perubahan iklim.

A. Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Tanah

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan terbesar yang dihadapi dunia saat ini, dan dampaknya terhadap tanah sangat signifikan. Peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, dan frekuensi kejadian cuaca ekstrem dapat mempengaruhi proses pembentukan tanah, kesuburan, dan kesehatan ekosistem tanah. Menurut IPCC (2021), perubahan iklim dapat mempercepat erosi tanah, meningkatkan risiko pencemaran, dan mengubah siklus hidrologi.

Suhu yang lebih tinggi dapat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam tanah. Dengan meningkatnya suhu, aktivitas mikroba dapat meningkat, tetapi dalam kondisi tertentu, hal ini juga dapat menyebabkan penurunan kandungan bahan organik tanah. Penelitian oleh Zhang et al. (2017) menunjukkan bahwa peningkatan suhu dapat mempercepat dekomposisi bahan organik, yang berpotensi mengurangi kesuburan tanah.

Perubahan pola curah hujan, termasuk intensitas dan frekuensi hujan, juga memiliki dampak besar pada tanah. Curah hujan yang lebih tinggi dapat menyebabkan peningkatan aliran permukaan, yang berkontribusi pada erosi dan kehilangan nutrisi. Sebaliknya, periode kekeringan dapat mengurangi kelembaban tanah dan menghambat pertumbuhan tanaman. Menurut D'Odorico et al. (2018), perubahan ini dapat menyebabkan penurunan produktivitas pertanian di banyak wilayah, terutama di daerah yang bergantung pada curah hujan.

Frekuensi kejadian cuaca ekstrem, seperti banjir dan kekeringan, juga dapat memperburuk kondisi tanah. Banjir dapat mengakibatkan pencemaran tanah dengan bahan kimia dan limbah, sedangkan kekeringan dapat meningkatkan salinitas tanah, yang dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Penelitian oleh Zhao et al. (2019)

menunjukkan bahwa kekeringan yang berkepanjangan dapat mengakibatkan penurunan signifikan dalam produksi pertanian.

Selain itu, perubahan iklim dapat memengaruhi kemampuan tanah dalam menyimpan karbon. Tanah berfungsi sebagai salah satu penyimpan karbon terbesar di biosfer, dan perubahan dalam kondisi tanah dapat mempengaruhi siklus karbon global. Penelitian oleh Schmidt et al. (2019) menunjukkan bahwa pengelolaan yang baik dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon dalam tanah, membantu mitigasi perubahan iklim.

Oleh karena itu, penting untuk memahami interaksi antara tanah dan perubahan iklim untuk merumuskan strategi adaptasi dan mitigasi yang efektif. Pengelolaan tanah yang berkelanjutan dapat memainkan peran kunci dalam membangun ketahanan terhadap perubahan iklim.

B. Strategi Adaptasi dan Mitigasi untuk Tanah

Untuk menghadapi dampak perubahan iklim, strategi adaptasi dan mitigasi yang efektif diperlukan. Adaptasi mengacu pada perubahan dalam praktik manajemen tanah untuk mengurangi kerentanan terhadap dampak perubahan iklim. Sementara itu, mitigasi berfokus pada upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca melalui pengelolaan tanah yang baik.

Salah satu strategi adaptasi yang penting adalah penerapan praktik agroekologi, yang berfokus pada penggunaan prinsip ekologi dalam pengelolaan pertanian. Praktik ini mencakup penggunaan tanaman penutup, rotasi tanaman, dan peningkatan keanekaragaman tanaman untuk memperkuat ketahanan sistem pertanian. Menurut Altieri (2018), agroekologi dapat meningkatkan ketahanan tanah terhadap kekeringan dan meningkatkan produksi makanan secara berkelanjutan.

Penerapan teknologi pertanian cerdas iklim juga merupakan strategi mitigasi yang penting. Teknologi seperti pemantauan kelembaban tanah dan penggunaan pupuk yang efisien dapat membantu petani mengelola sumber daya dengan lebih baik. Penelitian oleh Thornton et al. (2018) menunjukkan bahwa teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi emisi gas rumah kaca dari praktik pertanian.

Rehabilitasi tanah terdegradasi juga menjadi bagian penting dari strategi adaptasi dan mitigasi. Program rehabilitasi yang melibatkan penanaman kembali vegetasi, penggunaan pupuk organik, dan perlindungan dari erosi dapat meningkatkan kesehatan tanah dan kapasitas penyimpanan karbon. Menurut Lal (2016), rehabilitasi tanah

terdegradasi dapat meningkatkan kesuburan dan produktivitas pertanian dalam jangka panjang.

Selain itu, pentingnya peningkatan kesadaran dan pendidikan bagi petani tentang pengelolaan tanah yang berkelanjutan tidak boleh diabaikan. Edukasi dapat membantu petani memahami dampak perubahan iklim dan pentingnya praktik pengelolaan yang baik. Penelitian oleh Garcia et al. (2020) menunjukkan bahwa program pelatihan yang baik dapat meningkatkan penerapan praktik berkelanjutan di kalangan petani.

Kerjasama antara pemerintah, ilmuwan, dan petani juga penting untuk menyusun kebijakan yang mendukung pengelolaan tanah yang berkelanjutan. Kebijakan yang mempromosikan praktik pertanian berkelanjutan dan mendukung penelitian tentang perubahan iklim akan membantu meningkatkan ketahanan sistem pertanian. Menurut FAO (2021), kolaborasi ini dapat mengarah pada pengembangan solusi yang lebih efektif untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim.

Dengan mengimplementasikan strategi adaptasi dan mitigasi yang efektif, kita dapat menjaga kesehatan tanah dan meningkatkan ketahanan pangan di tengah perubahan iklim.

C. Kesuburan Tanah dan Perubahan Iklim

Perubahan iklim telah menjadi salah satu isu global paling mendesak yang mempengaruhi berbagai aspek kehidupan, termasuk kesuburan tanah. Perubahan iklim dapat memicu perubahan dalam suhu, pola curah hujan, dan frekuensi kejadian ekstrem, seperti kekeringan dan banjir, yang semuanya berdampak langsung pada kemampuan tanah untuk mendukung kehidupan tumbuhan. Kesuburan tanah, yang menjadi faktor utama dalam produktivitas ekosistem dan pertanian, sangat rentan terhadap perubahan lingkungan ini.

Salah satu dampak utama perubahan iklim terhadap kesuburan tanah adalah perubahan suhu. Kenaikan suhu global mempengaruhi proses biologis dalam tanah, termasuk aktivitas mikroorganisme dan dekomposisi bahan organik. Aktivitas mikroorganisme yang lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi dapat menyebabkan percepatan dekomposisi bahan organik dan pelepasan karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer. Hal ini tidak hanya mengurangi kandungan bahan organik yang berfungsi sebagai sumber nutrisi bagi tanaman, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan emisi gas rumah kaca, yang memperburuk perubahan iklim.

Pola curah hujan yang tidak teratur akibat perubahan iklim juga mempengaruhi kesuburan tanah. Di banyak wilayah, perubahan iklim menyebabkan curah hujan yang lebih intens atau kekeringan yang berkepanjangan. Curah hujan yang berlebihan dapat mengakibatkan erosi tanah, yang menyebabkan hilangnya lapisan tanah atas yang kaya akan nutrisi. Sebaliknya, kekeringan yang berkepanjangan dapat mengurangi kelembapan tanah, sehingga menurunkan aktivitas biologis dan mengurangi ketersediaan air bagi tanaman.

Kejadian cuaca ekstrem, seperti banjir dan kekeringan, juga berdampak signifikan pada struktur fisik tanah. Banjir dapat menyebabkan kompaksi tanah yang mengurangi porositas dan kemampuan tanah untuk menyerap air. Kompaksi tanah membuat air sulit meresap ke dalam tanah, yang pada gilirannya mengurangi suplai air bagi tanaman dan mengganggu pertumbuhan akar. Sebaliknya, kekeringan yang berkepanjangan dapat menyebabkan retakan tanah yang memperburuk kondisi fisik tanah dan mengurangi kemampuan tanah untuk menahan air.

Selain itu, perubahan iklim juga berdampak pada kandungan unsur hara dalam tanah. Perubahan suhu dan curah hujan dapat mempengaruhi ketersediaan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Sebagai contoh, peningkatan suhu dapat mempercepat mineralisasi nitrogen, tetapi juga dapat meningkatkan pencucian nitrogen dari tanah selama curah hujan yang intens. Akibatnya, tanah kehilangan nutrisi yang penting bagi tanaman, sehingga menurunkan produktivitas tanah dalam jangka panjang.

Perubahan iklim juga mempengaruhi interaksi antara tanah dan vegetasi. Vegetasi memiliki peran penting dalam menjaga kesuburan tanah melalui siklus nutrisi dan penyediaan bahan organik. Namun, perubahan iklim dapat mempengaruhi pola pertumbuhan tanaman dan komposisi spesies vegetasi yang ada di ekosistem hutan dan pertanian. Pergeseran jenis tanaman yang tidak sesuai dengan kondisi iklim lokal dapat mengurangi kemampuan tanah untuk mendukung produktivitas vegetasi, yang pada akhirnya mempengaruhi keseimbangan ekosistem secara keseluruhan.

Salah satu dampak jangka panjang dari perubahan iklim terhadap kesuburan tanah adalah degradasi tanah. Degradasi tanah yang disebabkan oleh erosi, penurunan kualitas tanah, dan kehilangan unsur hara mengurangi kemampuan tanah untuk mendukung produktivitas pertanian dan kehutanan. Hal ini dapat memperburuk ketahanan pangan global, terutama di wilayah-wilayah yang sangat bergantung pada sumber daya alam untuk keberlangsungan hidup.

Adaptasi terhadap perubahan iklim menjadi kunci dalam mitigasi dampak terhadap kesuburan tanah. Beberapa strategi yang dapat diterapkan meliputi penerapan pertanian konservasi, penggunaan pupuk yang efisien, serta penerapan teknik agroforestri dan reboisasi untuk menjaga keseimbangan nutrisi dan struktur tanah. Selain itu, penelitian lebih lanjut mengenai interaksi antara tanah dan perubahan iklim diperlukan untuk memahami dinamika yang terjadi dan mengembangkan kebijakan yang tepat.

Kesimpulannya, dampak perubahan iklim terhadap kesuburan tanah merupakan tantangan yang harus dihadapi melalui pendekatan multidisipliner. Kesuburan tanah merupakan fondasi dari ekosistem dan produktivitas lahan yang berkelanjutan. Oleh karena itu, upaya untuk memitigasi dampak perubahan iklim dan mengelola tanah secara berkelanjutan menjadi sangat penting untuk menjaga ekosistem yang sehat dan mendukung ketahanan pangan global.

Contoh Soal

1. Apa saja dampak perubahan iklim terhadap tanah dan produktivitas pertanian? (10 poin)
2. Jelaskan beberapa strategi adaptasi yang dapat diterapkan untuk mengatasi dampak perubahan iklim pada tanah! (10 poin)
3. Diskusikan pentingnya rehabilitasi tanah terdegradasi dalam konteks perubahan iklim! (10 poin).
4. Bagaimana perubahan suhu akibat perubahan iklim mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dan kesuburan tanah?
5. Jelaskan dampak dari curah hujan yang tidak teratur terhadap ketersediaan air dan nutrisi dalam tanah.
6. Apa yang terjadi pada struktur fisik tanah ketika terjadi banjir yang sering akibat perubahan iklim?
7. Bagaimana pergeseran vegetasi yang disebabkan oleh perubahan iklim mempengaruhi siklus nutrisi dalam tanah?
8. Jelaskan strategi mitigasi yang dapat dilakukan untuk menjaga kesuburan tanah dalam menghadapi perubahan iklim!

BAB 14

AGROFORESTRI DAN KESUBURAN TANAH

A. Sistem Agroforestri

Agroforestri merupakan salah satu pendekatan pengelolaan lahan yang menggabungkan penanaman pohon atau tanaman kehutanan dengan tanaman pertanian di lahan yang sama. Sistem ini memiliki berbagai manfaat, termasuk dalam meningkatkan kesuburan tanah. Melalui integrasi tanaman hutan dengan tanaman pertanian, agroforestri mendukung siklus nutrisi, mengurangi erosi tanah, dan meningkatkan struktur tanah. Dengan demikian, agroforestri menjadi solusi berkelanjutan untuk meningkatkan kesuburan tanah sambil mempertahankan produktivitas lahan.

Salah satu cara agroforestri meningkatkan kesuburan tanah adalah melalui penambahan bahan organik. Pohon-pohon dalam sistem agroforestri menyediakan serasah daun yang jatuh ke permukaan tanah, yang kemudian diuraikan oleh mikroorganisme menjadi bahan organik. Bahan organik ini memperkaya tanah dengan unsur hara esensial seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang diperlukan oleh tanaman. Selain itu, bahan organik juga membantu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air, dan menyediakan habitat bagi mikroorganisme yang berperan penting dalam siklus nutrisi tanah.

Selain itu, agroforestri juga efektif dalam mengurangi erosi tanah. Akar pohon yang dalam dapat menahan lapisan tanah dari aliran air yang deras, sehingga mengurangi risiko erosi permukaan yang sering terjadi di lahan pertanian konvensional. Pohon juga berfungsi sebagai penghalang alami terhadap angin kencang yang dapat menyebabkan erosi angin. Dengan demikian, agroforestri berkontribusi pada pemeliharaan lapisan tanah atas yang kaya akan nutrisi, menjaga kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Keanekaragaman spesies tanaman dalam sistem agroforestri juga memberikan manfaat bagi kesuburan tanah. Kombinasi antara pohon, tanaman penutup tanah, dan tanaman pangan menciptakan siklus nutrisi yang lebih seimbang. Tanaman penutup tanah seperti legum mampu memperbaiki nitrogen dalam tanah melalui simbiosis dengan bakteri pengikat nitrogen, yang menghasilkan nitrogen dalam bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman lainnya. Hal ini mengurangi kebutuhan penggunaan pupuk sintetis, sekaligus menjaga keseimbangan hara dalam tanah.

Interaksi antara pohon dan tanaman dalam agroforestri juga membantu meningkatkan kesehatan biologis tanah. Pohon dengan sistem akar yang mendalam dapat mengambil nutrisi dari lapisan tanah yang lebih dalam dan mendaur ulangnya ke permukaan melalui daun yang gugur. Proses ini membantu mendistribusikan nutrisi di seluruh lapisan tanah, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman pertanian. Selain itu, pohon menyediakan habitat yang ideal bagi mikroorganisme tanah, cacing tanah, dan organisme lain yang berperan dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi.

B. Manfaat Agroforestri

Manfaat agroforestri tidak hanya terbatas pada kesuburan tanah, tetapi juga mendukung konservasi air dan pengurangan dampak perubahan iklim. Sistem akar pohon yang dalam membantu meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah, sehingga meningkatkan kapasitas tanah untuk menyimpan air dan mencegah kekeringan. Agroforestri juga berperan dalam penyerapan karbon dioksida dari atmosfer melalui pohon-pohon yang menyerap dan menyimpan karbon dalam jaringan mereka. Ini membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan mitigasi perubahan iklim yang pada gilirannya berdampak pada kestabilan ekosistem tanah.

Agroforestri juga mendukung diversifikasi sumber pendapatan bagi petani. Selain tanaman pangan, petani juga dapat memanfaatkan hasil pohon seperti kayu, buah-buahan, getah, atau tanaman obat. Diversifikasi ini meningkatkan ketahanan ekonomi petani terhadap fluktuasi pasar atau kegagalan panen akibat cuaca ekstrem. Sistem agroforestri yang multifungsi ini juga memungkinkan petani untuk meningkatkan kualitas tanah sekaligus mendapatkan hasil yang lebih beragam dari lahan yang sama.

Meskipun agroforestri menawarkan banyak manfaat, penerapannya tidak selalu mudah. Beberapa tantangan yang dihadapi dalam pengembangan agroforestri adalah kurangnya pengetahuan tentang sistem agroforestri di kalangan petani, keterbatasan akses ke bibit pohon yang cocok, dan kebutuhan akan kebijakan yang mendukung. Oleh karena itu, diperlukan kerjasama antara pemerintah, akademisi, dan masyarakat untuk mendorong adopsi sistem agroforestri sebagai solusi berkelanjutan dalam pengelolaan lahan dan kesuburan tanah.

Sebagai langkah ke depan, penelitian lebih lanjut tentang interaksi spesies tanaman dalam sistem agroforestri serta dampaknya terhadap kesuburan tanah perlu terus dikembangkan. Pengembangan teknologi untuk memantau kesehatan tanah dan ketersediaan nutrisi juga dapat membantu petani dalam mengelola lahan secara lebih

efisien dan ramah lingkungan. Dengan demikian, agroforestri dapat menjadi bagian integral dari strategi pertanian berkelanjutan yang tidak hanya memperbaiki kualitas tanah, tetapi juga mendukung ketahanan pangan dan adaptasi terhadap perubahan iklim.

Secara keseluruhan, agroforestri memainkan peran penting dalam meningkatkan kesuburan tanah, menjaga ekosistem lahan, dan mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan. Melalui integrasi pohon dan tanaman pangan, agroforestri menciptakan sistem yang lebih stabil secara ekologis dan produktif secara ekonomi, sehingga dapat membantu menjawab tantangan global terkait degradasi tanah dan ketahanan pangan.

C. Manfaat Agroforestri terhadap Kesuburan Tanah

1. Pengembalian Nutrisi Tanah: Tanaman pohon dalam agroforestri memiliki kemampuan untuk menyerap nutrisi dari lapisan tanah yang lebih dalam melalui akar yang dalam, kemudian melepaskannya kembali ke permukaan tanah melalui guguran daun, ranting, dan buah. Proses ini membantu menjaga kandungan hara tanah dan mencegah degradasi lahan.
2. Penambahan Bahan Organik : Guguran daun dan sisa-sisa tanaman dari pohon dan semak yang terlibat dalam agroforestri terdekomposisi dan menambah kandungan bahan organik tanah. Bahan organik ini penting untuk memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air, dan menyediakan habitat bagi mikroorganisme tanah.
3. Perbaikan Struktur Tanah : Sistem akar pohon dalam agroforestri membantu mencegah erosi dan meningkatkan stabilitas tanah. Akar yang kuat menciptakan ruang pori di tanah, yang pada gilirannya membantu dalam penyerapan air dan menjaga aerasi tanah.
4. Penurunan Erosi Tanah : Vegetasi dalam agroforestri, seperti pohon dan semak, membantu menahan laju erosi tanah dengan mengurangi dampak langsung air hujan di permukaan tanah. Akar pohon juga menstabilkan tanah, sehingga mengurangi risiko erosi.
5. Siklus Nitrogen : Beberapa tanaman dalam agroforestri, seperti legum, memiliki kemampuan untuk mengikat nitrogen dari atmosfer dan menambahkannya ke tanah. Ini meningkatkan ketersediaan nitrogen bagi tanaman lain, sehingga mengurangi kebutuhan pupuk anorganik.

6. Peningkatan Aktivitas Mikroba Tanah : Penambahan bahan organik dari sisa-sisa tanaman memperkaya tanah dengan nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme. Aktivitas mikroba yang tinggi meningkatkan dekomposisi bahan organik dan penyediaan nutrisi bagi tanaman.

❑ Soal Pilihan Ganda

1. Apa manfaat utama agroforestri terhadap tanah?
- Meningkatkan erosi tanah
 - Mengurangi bahan organik tanah
 - Meningkatkan bahan organik dan kesuburan tanah
 - Menyerap nutrisi dari tanah tanpa pengembalian.

Jawaban: c) Meningkatkan bahan organik dan kesuburan tanah.

❑ Soal Esai Pertanyaan :

- Jelaskan bagaimana sistem agroforestri dapat meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah.
- Bagaimana pohon dalam agroforestri berperan dalam mencegah erosi tanah?
- Jelaskan peran tanaman legum dalam sistem agroforestri terkait dengan peningkatan kesuburan tanah.
- Bagaimana agroforestri dapat membantu mitigasi perubahan iklim dan apa dampaknya terhadap kesuburan tanah?
- Sebutkan beberapa tantangan yang dihadapi dalam implementasi agroforestri dan bagaimana cara mengatasinya!
- Jelaskan bagaimana tanaman leguminosa dalam agroforestri berkontribusi terhadap siklus nitrogen dan kesuburan tanah.

BAB 15

STATUS KESUBURAN TANAH

A. Langkah-langkah Menentukan Status Kesuburan Tanah:

1. Pengambilan Sampel Tanah
 - Ambil sampel tanah dari beberapa titik di area yang akan dianalisis. Sampel ini kemudian dianalisis di laboratorium untuk mengetahui kandungan hara dan karakteristik fisik tanah.
2. Analisis Kimiawi Tanah
 - Laboratorium akan menganalisis kandungan makronutrien (seperti nitrogen, fosfor, kalium) dan mikronutrien (seperti besi, mangan, boron), pH tanah, kadar bahan organik, dan kapasitas tukar kation (KTK).
 - Pengujian lain mungkin termasuk cek tingkat salinitas dan keasaman tanah.
3. Interpretasi Hasil
 - Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan standar yang berlaku untuk mengetahui apakah tanah memiliki tingkat kesuburan yang rendah, sedang, atau tinggi.
4. Penentuan Rekomendasi
 - Berdasarkan hasil interpretasi, direkomendasikan aplikasi pupuk atau bahan organik untuk meningkatkan kesuburan tanah sesuai kebutuhan tanaman yang akan dibudidayakan.

Menentukan tingkat kesuburan tanah (rendah, sedang, atau tinggi) didasarkan pada parameter kimiawi tanah yang meliputi kandungan unsur hara, pH, kapasitas tukar kation (KTK), dan bahan organik. Berikut adalah standar umum untuk mengklasifikasikan tingkat kesuburan tanah berdasarkan parameter-parameter tersebut:

1. Nitrogen (N)

Nitrogen adalah unsur penting bagi pertumbuhan tanaman, khususnya dalam pembentukan daun.

- Rendah: < 0,1% N total
- Sedang: 0,1 - 0,2% N total
- Tinggi: > 0,2% N total

2. Fosfor (P)

Fosfor penting untuk pembentukan akar dan transfer energi di dalam tanaman.

- Rendah: < 10 mg/kg (ppm) P tersedia
- Sedang: 10 - 20 mg/kg (ppm) P tersedia
- Tinggi: > 20 mg/kg (ppm) P tersedia

3. Kalium (K)

Kalium mendukung proses fotosintesis dan ketahanan terhadap penyakit.

- Rendah: < 50 mg/kg (ppm) K tersedia
- Sedang: 50 - 200 mg/kg (ppm) K tersedia
- Tinggi: > 200 mg/kg (ppm) K tersedia

4. Bahan Organik Tanah

Bahan organik meningkatkan struktur tanah dan penyediaan nutrisi bagi tanaman.

- Rendah: < 2% bahan organik
- Sedang: 2 - 5% bahan organik
- Tinggi: > 5% bahan organik

5. pH Tanah

Tingkat keasaman atau kebasaan tanah berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara.

- Asam (pH rendah): $< 5,5$ (biasanya tidak optimal untuk sebagian besar tanaman, kecuali beberapa tanaman asam)
- Netral: $6,0 - 7,0$ (ideal untuk sebagian besar tanaman)
- Basa (pH tinggi): $> 7,5$ (dapat menyebabkan kekurangan hara mikro tertentu, seperti besi dan mangan)

6. Kapasitas Tukar Kation (KTK)

KTK adalah kemampuan tanah untuk menyimpan dan menyediakan kation nutrisi bagi tanaman. Nilai ini mencerminkan kapasitas tanah untuk menyediakan hara.

- Rendah: $< 10 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$
- Sedang: $10 - 20 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$
- Tinggi: $> 20 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$

7. Salinitas (EC - Electrical Conductivity)

Kandungan garam dalam tanah yang berlebih dapat menghambat penyerapan air oleh tanaman.

- Rendah: $< 2 \text{ dS/m}$ (tanaman normal dapat tumbuh)
- Sedang: $2 - 4 \text{ dS/m}$ (tanaman mulai menunjukkan gejala stres)
- Tinggi: $> 4 \text{ dS/m}$ (tanaman sangat rentan terhadap kerusakan)

8. Mikronutrien (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl)

- Rendah: Di bawah kisaran yang diperlukan untuk pertumbuhan normal tanaman (berbeda tergantung pada jenis unsur hara).
- Sedang: Sesuai kisaran yang cukup untuk pertumbuhan tanaman.
- Tinggi: Di atas kebutuhan tanaman, yang dalam beberapa kasus dapat berpotensi menjadi toksik.

B. Standar Internasional (FAO dan USDA)

Standar ini sering digunakan oleh para ahli agronomi, ilmuwan tanah, dan lembaga penelitian untuk mengevaluasi kesuburan tanah. Variasi standar dapat terjadi tergantung pada wilayah dan kondisi lingkungan lokal. Misalnya, lahan tropis memiliki kondisi yang berbeda dibandingkan lahan di wilayah beriklim sedang.

Contoh Standar Kesuburan Tanah:

- FAO (Food and Agriculture Organization) memiliki panduan untuk evaluasi tanah yang digunakan secara global.
- USDA (United States Department of Agriculture) juga memiliki panduan yang detail mengenai klasifikasi tanah, termasuk dalam hal tingkat kesuburan tanah.

Kriteria kesuburan tanah (rendah, sedang, atau tinggi) ditentukan berdasarkan beberapa parameter penting seperti kandungan unsur hara, bahan organik, pH tanah, kapasitas tukar kation (KTK), dan salinitas. Berikut ini adalah penjelasan kriteria dari masing-masing parameter untuk menentukan tingkat kesuburan tanah:

1. Kandungan Unsur Hara

- Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K) adalah unsur hara makro yang paling penting bagi pertumbuhan tanaman. Kadar unsur ini di tanah menentukan status kesuburan.
 - Rendah: Tanah dengan kandungan unsur hara makro di bawah standar optimal untuk pertumbuhan tanaman. Biasanya kandungan N < 0,1%, P tersedia < 10 ppm, dan K tersedia < 50 ppm.
 - Sedang: Kandungan unsur hara mendekati atau sesuai kebutuhan minimum tanaman, namun mungkin masih memerlukan suplementasi (N = 0,1-0,2%, P = 10-20 ppm, K = 50-200 ppm).
 - Tinggi: Kandungan unsur hara mencukupi atau melebihi kebutuhan tanaman untuk pertumbuhan optimal (N > 0,2%, P > 20 ppm, K > 200 ppm).

2. Bahan Organik Tanah

- Bahan organik memainkan peran penting dalam menyediakan nutrisi, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kapasitas retensi air.
 - Rendah: < 2% bahan organik di dalam tanah. Ini menunjukkan bahwa tanah memiliki sedikit sumber nutrisi alami.
 - Sedang: 2 - 5% bahan organik. Ini adalah tingkat yang umumnya baik untuk pertumbuhan tanaman, tetapi mungkin memerlukan perbaikan untuk beberapa jenis tanaman.
 - Tinggi: > 5% bahan organik, menunjukkan tanah yang sangat subur dan kaya nutrisi alami.

3. pH Tanah (Keasaman/Kebraskaan)

- pH tanah memengaruhi ketersediaan unsur hara bagi tanaman.
 - Rendah: pH < 5,5 (tanah asam), nutrisi seperti fosfor dan unsur mikro kurang tersedia bagi tanaman.
 - Sedang: pH 6 - 7 adalah rentang ideal untuk sebagian besar tanaman, di mana nutrisi mudah tersedia dan tanah dalam kondisi subur.
 - Tinggi: pH > 7,5 (tanah basa), beberapa unsur seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) menjadi kurang tersedia meskipun unsur lain seperti kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) tersedia dalam jumlah cukup tinggi.

4. Kapasitas Tukar Kation (KTK)

- KTK menunjukkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan menyediakan kation penting seperti kalium, kalsium, dan magnesium.
 - Rendah: < 10 cmol(+)/kg, menunjukkan bahwa tanah memiliki kemampuan rendah untuk menahan unsur hara, biasanya terjadi pada tanah berpasir.
 - Sedang: 10 - 20 cmol(+)/kg, menunjukkan kemampuan yang cukup untuk menahan unsur hara bagi pertumbuhan tanaman yang baik.
 - Tinggi: > 20 cmol(+)/kg, menunjukkan tanah sangat subur dengan kapasitas tinggi untuk menyimpan dan menyediakan nutrisi.

5. Salinitas (Kadar Garam dalam Tanah)

- Tingkat salinitas atau keasinan tanah mempengaruhi kemampuan tanaman untuk menyerap air dan nutrisi.
 - Rendah: < 2 dS/m, cocok untuk pertumbuhan tanaman normal.
 - Sedang: 2 - 4 dS/m, mulai menurunkan pertumbuhan beberapa tanaman yang sensitif terhadap garam.
 - Tinggi: > 4 dS/m, akan menyebabkan penurunan signifikan dalam pertumbuhan tanaman karena stres akibat garam.

6. Mikronutrien (Fe, Mn, Zn, Cu, B)

- Mikronutrien dibutuhkan dalam jumlah kecil, tetapi kekurangannya dapat menyebabkan gangguan pada tanaman.
 - Rendah: Kandungan mikronutrien di bawah tingkat yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman normal, menyebabkan gejala defisiensi.
 - Sedang: Cukup untuk memenuhi kebutuhan tanaman dan mendukung pertumbuhan optimal.
 - Tinggi: Kandungan berlebih, yang dapat menyebabkan toksisitas pada tanaman.

7. Struktur dan Tekstur Tanah

- Tekstur tanah yang baik memungkinkan penetrasi akar yang lebih baik dan drainase air yang optimal.
 - Rendah: Tanah dengan tekstur berat (misalnya tanah liat) atau sangat berpasir, yang tidak ideal untuk pertumbuhan tanaman karena terlalu padat atau terlalu porous.
 - Sedang: Tekstur tanah lempung atau lempung berpasir yang ideal untuk pertumbuhan tanaman.
 - Tinggi: Tekstur yang baik, dengan kelembapan dan drainase yang seimbang serta ruang udara yang baik untuk pertumbuhan akar.

❑ Kriteria kesuburan tanah

- Kesuburan Rendah: Kandungan unsur hara, bahan organik, KTK, atau pH di luar rentang optimal. Tanah memerlukan input eksternal seperti pupuk atau bahan organik untuk mendukung pertumbuhan tanaman.
- Kesuburan Sedang: Parameter-parameter tanah berada pada tingkat moderat, mendekati optimal tetapi mungkin membutuhkan sedikit suplementasi atau pengelolaan tambahan.
- Kesuburan Tinggi: Semua parameter berada dalam rentang optimal atau di atasnya. Tanah secara alami subur, menyediakan nutrisi yang cukup bagi tanaman tanpa banyak intervensi.

Dengan memahami kriteria-kriteria ini, Anda dapat menilai status kesuburan tanah secara akurat dan mengambil langkah-langkah untuk memperbaikinya jika diperlukan.

Kombinasi beberapa sifat kimia tanah dan status kesuburan tanahnya seperti pada tabel berikut :

Tabel 16.1. Kombinasi beberapa sifat kimia tanah dan status kesuburan tanahnya

No.	KTK	KB	P ₂ O ₅ ; K ₂ O; CO ₂ g	Status Kesuburan
1.	T	T	≥ 2 T tanpa R	Tinggi
2.	T	T	≥ 2 T dengan R	Sedang
3.	T	T	≥ 2 S tanpa R	Tinggi
4.	T	T	≥ 2 S dengan R	Sedang
5.	T	T	T S R	Sedang
6.	T	T	≤ 2 R dengan T	Sedang
7.	T	T	≤ 2 R dengan S	Rendah

8.	T	S	$\geq 2 T$ Tanpa R	Tinggi
9.	T	S	$\geq 2 T$ dengan R	Sedang
10.	T	S	$\geq 2 R - 2 S$	Sedang
11.	T	S	Kombinasi lain	Rendah
12.	T	R	$\geq 2 T$ tanpa R	Sedang
13.	T	R	$\geq 2 R$ dengan R	Rendah
14.	T	R	Kombinasi lain	Rendah
15.	S	T	$\geq 2 T$ dengan R	Sedang
16.	S	T	$\geq 2 S$ dengan R	Sedang
17.	S	T	Kombinasi lain	Rendah
18.	S	S	$\geq 2 T$ tanpa R	Sedang
19.	S	S	$\geq 2 S$ tanpa R	Sedang
20.	S	S	Kombinasi lain	Rendah
21.	S	R	$3 T$	Sedang
22.	S	R	Kombinasi lain	Rendah
23.	R	T	$\geq 2 T$ tanpa R	Sedang
24.	R	T	$\geq 2 T$ dengan R	Rendah
25.	R	T	$\geq 2 S$ tanpa R	Sedang
26.	R	T	Kombinasi lain	Rendah

27.	R	S	$\geq 2 T$ tanpa R	Sedang
28.	R	S	Kombinasi lain	Rendah
29.	R	R	Semua kombinasi	Rendah
30.	SR	T,R,S	Semua kombinasi	Sangat rendah

Keterangan : T = Tinggi, S = Sedang, R = Rendah, SR = Sangat rendah

D. Penelitian dan Pengembangan Dalam Kesuburan Tanah

Penelitian dan pengembangan (litbang) dalam bidang kesuburan tanah memegang peranan penting untuk menghadapi tantangan global yang berkaitan dengan peningkatan produksi pertanian dan mitigasi perubahan iklim. Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai masalah telah diidentifikasi sebagai fokus utama penelitian untuk meningkatkan produktivitas tanah sambil menjaga keberlanjutan ekosistem. Berikut adalah lima masalah penelitian utama dalam bidang kesuburan tanah :

❑ Dinamika Karbon Organik Tanah dan Perannya dalam Kesuburan Tanah

Masalah Penelitian: Bagaimana dinamika karbon organik tanah (SOC) mempengaruhi kesuburan tanah dalam berbagai sistem pertanian, terutama di lahan-lahan marginal yang terancam degradasi? Latar Belakang: Karbon organik tanah adalah salah satu indikator utama kesehatan tanah karena memainkan peran penting dalam struktur tanah, retensi air, dan ketersediaan nutrisi. Perubahan dalam kandungan karbon tanah, terutama akibat pengolahan tanah yang berlebihan, penggunaan pupuk kimia, dan deforestasi, dapat mempengaruhi kesuburan tanah secara signifikan. Oleh karena itu, penelitian tentang dinamika karbon organik tanah dalam berbagai kondisi lahan sangat penting untuk memahami bagaimana cara meningkatkan kesuburan tanah secara berkelanjutan.

❑ Efek Pemupukan Berlebih terhadap Keseimbangan Nutrisi Tanah dan Kesehatan Ekosistem

Masalah Penelitian: Bagaimana pemupukan berlebih, terutama penggunaan pupuk nitrogen dan fosfor yang berlebihan, mempengaruhi keseimbangan nutrisi tanah dan kesehatan ekosistem tanah jangka panjang? Latar Belakang: Penggunaan pupuk yang berlebihan, terutama pupuk kimia sintesis, telah menjadi masalah utama di banyak negara, termasuk Indonesia. Dampaknya adalah ketidakseimbangan nutrisi tanah yang

menyebabkan degradasi kesuburan tanah dan pencemaran lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk memahami bagaimana dampak jangka panjang pemupukan berlebih terhadap keseimbangan nutrisi tanah serta mengidentifikasi praktik pengelolaan yang dapat memperbaiki kesuburan tanah tanpa mengorbankan produktivitas pertanian.

❑ Peran Mikroorganisme dalam Meningkatkan Ketersediaan Nutrisi dan Kesuburan Tanah

Masalah Penelitian: Bagaimana mikroorganisme tanah, seperti bakteri pengikat nitrogen dan fungi mikoriza, dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman serta memperbaiki kesuburan tanah secara alami? Latar Belakang: Mikroorganisme tanah memegang peranan penting dalam siklus nutrisi. Penelitian tentang interaksi antara mikroorganisme tanah dan tanaman dapat membuka peluang untuk meningkatkan kesuburan tanah secara alami, tanpa ketergantungan pada pupuk kimia. Penggunaan biofertilizer yang mengandung mikroorganisme ini berpotensi mengurangi dampak negatif pertanian konvensional terhadap lingkungan sambil meningkatkan produktivitas pertanian.

❑ Dampak Perubahan Iklim terhadap Kesuburan Tanah di Wilayah Tropis

Masalah Penelitian: Bagaimana perubahan iklim mempengaruhi kesuburan tanah di wilayah tropis, khususnya terkait dengan peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan kejadian cuaca ekstrem? Latar Belakang: Perubahan iklim membawa tantangan besar bagi pengelolaan tanah, terutama di wilayah tropis yang rentan terhadap degradasi. Kondisi iklim ekstrem seperti curah hujan berlebih dan kekeringan dapat mengakibatkan kehilangan nutrisi melalui pencucian dan erosi. Penelitian ini berfokus pada bagaimana perubahan iklim mempengaruhi dinamika kesuburan tanah dan langkah-langkah adaptasi yang dapat diambil untuk mempertahankan produktivitas pertanian.

❑ Pengaruh Pengolahan Tanah Konservasi terhadap Kesuburan Tanah dan Produktivitas Tanaman

Masalah Penelitian: Bagaimana praktik pengolahan tanah konservasi, seperti tanpa olah tanah (no-till) dan rotasi tanaman, mempengaruhi kesuburan tanah dan produktivitas tanaman dalam jangka panjang? Latar Belakang: Pengolahan tanah konservasi adalah metode yang bertujuan untuk mengurangi gangguan tanah guna

menjaga kesuburan dan struktur tanah. Namun, dampaknya terhadap produktivitas tanaman dan kesuburan tanah dalam jangka panjang masih menjadi bahan penelitian. Praktik-praktik seperti no-till dan penggunaan mulsa dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah, tetapi bagaimana hal ini memengaruhi produktivitas pertanian perlu dipelajari lebih lanjut.

❑ Penelitian Kesuburan Tanah

Hasil penelitian menunjukkan tingkat kesuburan tanah pada area hutan di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Universitas Lambung Mangkurat tergolong rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, J. (2019). *Forest Soil Management*. Cambridge University Press.
- Adesemoye, A.O., & Kloepper, J.W. (2009). *Plant-microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2196-0>
- Allen, M.R., et al. (2018). *Global Warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Alaoui, A., et al. (2022). *Root Interception and Nutrient Uptake in Agricultural Systems*.
- Alloway, B. J. (2013). *Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production*. Springer.
- Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. CRC Press.
- Anderson, M. A., et al. (2018). Advances in soil sensing technologies: A review. *Sensors*, 18(9), 3087.
- Anwar, S., et al. (2021). *Effects of climate change on soil fertility and productivity: A review*. In *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09069-9>
- Ascher, P., & Baumeister, H. (2023). *The Importance of Soil Depth for Root Development*. *Plant and Soil Interactions*, 28(1), 33-47.
- Assessment." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Vol 196, No. 3, pp. 233-245.
- Ayub, M.A., et al. (2021). Accumulation, partitioning, and bioavailability of micronutrients in plant and their crosstalk with phytohormones. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-61153-8_2. PP : 39-73.
- Bationo, A., & Waswa, B. (2022). *Soil fertility and nutrient management: An overview*. Springer Nature.
- Bhattacharyya, R., & Kundu, S. (2023). *Impact of soil organic matter on soil structure and fertility: A comprehensive review*. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 14(3), 158-172.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.

- Bindraban, P.S., Dimkpa, C.O., & Nagarajan, L. (2020). *Fertilizer and the Environment: Understanding the Environmental Impacts of Fertilizer Production and Use*. Elsevier.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2010). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson.
- Brown, L., Smith, J., & Thompson, R. (2022). *Sustainable Forestry and Soil Health*. Oxford University Press.
- Brown, M., et al. (2022). "Advances in Nanotechnology for Sustainable Agriculture: Nanofertilizers and Their Impact on Crop Yields." *Agricultural Science & Technology Journal*. Vol 58, No. 3, pp. 457-473.
- Busari, M.A., et al. (2017). *Conservation tillage impacts on soil, crop, and the environment*. In *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.05.002>
- Cation Exchange Capacity Working Group. (2018). Understanding cation exchange capacity in soils. *Journal of Soil Science*, 99(1), 19-28.
- Chen, L., Zhang, S., & Huang, D. (2019). "Nutrient management for optimal crop growth: A review of site-specific nutrient management practices". *Journal of Plant Nutrition*, 42(10), 1578-1590.
- Cheng, W., et al. (2023). "Advances in Plant Nutrient Analysis and Soil Fertility
- Chirwa, P. W., & Mahamane, A. (2020). "Agroforestry for Sustainable Land Use: Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications." *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 67.
- Davidson, E.A., et al. (2020). *The impact of climate change on soil properties and processes*. *Global Change Biology*, 26(2), 355-366. <https://doi.org/10.1111/gcb.14852>
- De Jong, E., et al. (2017). Soil structure and its effects on the soil ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 113, 185-196.
- Dempsey, M., et al. (2019). Soil organic matter and its role in sustainable agriculture. *Agricultural Sciences*, 10(3), 104-118.
- Drechsel, P., et al. (2015). *Fertilizer use in African agriculture and its implications for sustainable intensification*. In *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102(2), 203-220. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9701-5>

- Driessen, P. M., et al. (2018). *Fundamentals of Soil Science*. International Society of Soil Science.
- D'Odorico, P., et al. (2018). Global desertification: Drivers and feedbacks. *Earth-Science Reviews*, 175, 349-359.
- Edwards, C. A., & Bohlen, P. J. (2017). *Earthworm Ecology*. CRC Press.
- Eivazi, F., & Zhang, H. (2020). Soil enzyme activities as indicators of soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 147, 107861.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Jones, C. A. (2010). *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops* (3rd ed.). CRC Press.
- Fageria, N.K. (2017). *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press.
- Fernandez, V., & Eichert, T. (2019). *Uptake of Nutrients by Foliar Application*. In *Plant Physiology and Biochemistry*, 83: 247-252. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.007>
- Fageria, N. K., & Kirkby, E. A. (2006). *Principles of Plant Nutrition*.
- FAO. (2015). *The Status of the World's Soil Resources*. Food and Agriculture Organization.
- FAO. (2021). *Sustainable soil management and its role in the agenda 2030*. Rome: FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb4820en>
- FAO. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021*. Food and Agriculture Organization.
- Galloway, J. N., et al. (2014). Transformation of the nitrogen cycle: a global perspective. *Nature*, 463(7276), 186-192.
- Garcia, O., et al. (2017). Community participation in soil conservation programs: Success factors. *Land Use Policy*, 60, 36-45.
- Garcia, O., et al. (2020). The role of education in promoting sustainable land management practices. *Land Use Policy*, 94, 104576.
- Glover, J. D., et al. (2010). Improved soil quality and crop yields through conservation agriculture. *Field Crops Research*, 119(1), 1-10.
- Garcia, M., Flores, A., & Duncan, C. (2021). "Sustainable Irrigation Systems in Forestry." *Journal of Forestry Science*, 56(4), 789-804.
- Gordon, A. & Newman, C. (2022). "Agroforestry and Soil Fertility." *Forest Ecology*, 45(3), 67-80.

- Goh, K. M., et al. (2016). Soil pH and nutrient availability in sustainable agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 229, 15-24.
- Goh, K. J., et al. (2018). The role of fertilization in forest ecosystems. *New Forests*, 49(3), 617
- Griffiths, M., & York, L. (2020). *Plant Nutrient Uptake Strategies and Their Ecological Importance*.
- Hassan, R. & Smith, B. (2022). *Watershed Conservation and Soil Management*. Springer.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (8th ed.). Pearson.
- Hargreaves, P. R., et al. (2017). Soil analysis for sustainable agriculture. *Soil Use and Management*, 33(2), 182-195.
- Hillel, D. (2004). *Soil and Water Sustainability in Agriculture*. Elsevier.
- Houghton, L., Zhao, W., & Tang, X. (2021). "Integrated Harvesting Systems to Minimize Soil Degradation." *Global Forestry Review*, 38(5), 150-162.
- Huang, R. "Ecosystem Resilience and Soil Fertility in Forests." *Global Change Biology*, 2023.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jamshidi, B., et al. (2021). *Nanotechnology for Sustainable Agriculture: Advances and Challenges*. In *Science of the Total Environment*, 780, 146515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146515>
- Jastrow, J. D., & Miller, R. M. (2023). *Soil structure and soil microbial dynamics: Contributions to soil health*. *Applied Soil Ecology*, 190, 104693.
- Johnson, H., et al. (2022). "Macronutrient Deficiencies in Global Crops: Implications for Food Security." *Agricultural Research Review*. Vol 61, No. 2, pp. 123-139.
- Johnson, L. et al. (2022). "Impact of Nutrient Imbalance on Soil Health." *Soil Science Review*, 45(1), 75-90.
- Johnson, M. et al. (2023). "Nutrient Cycling in Forest Ecosystems: A Comparative Study Between Natural Forests and Plantations." *Forest Ecology and Management*, 467, 118-130.

- Jones, L., et al. (2022). *Soil Structure and Its Role in Plant Growth*. *Soil Dynamics*, 15(2), 98-112.
- Jones, C., et al. (2023). "Soil Microbiome and Plant Nutrient Acquisition: New Insights into Plant-Soil Interactions." *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. Vol 64, No. 2, pp. 233-248.
- Jose, S. (2020). *Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview*. In *Agroforestry Systems*, 94(3): 519-531. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00447-x>
- Journal of Environmental Management* (2023). "Sustainable Fertilization Practices: Balancing Organic and Inorganic Inputs."
- Kauffman, J. B., et al. (2018). Effects of fertilization on forest productivity. *Forest Ecology and Management*, 429, 253-260.
- Keesstra, S. D., et al. (2018). The significance of soils and soil science towards global sustainability. *Soil*, 4(3), 143-149.
- Kim, D.G., et al. (2016). *The role of agroforestry in reducing greenhouse gas emissions and enhancing carbon sequestration in the tropics*. In *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 226: 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.011>
- Kumar, V., Shahi, D. K., & Kumar, P. (2020). Role of soil pH in nutrient availability and plant growth. *Agriculture Review*, 41(2), 101-108.
- Kumar, S. & Reddy, V. (2023). *Forest Species Adaptation for Soil Fertility*. Nature Press.
- Kuo, S., et al. (2017). Soil pH and its effects on nutrient availability. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 807-817.
- Lal, R. (2019). *Soil degradation as a reason for diminished ecosystem services*. In *Agricultural and Forest Meteorology*, 271: 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.019>
- Lal, R. (2020). *Soil health and climate change: An overview*. In *Environmental Sustainability*, 3(2): 129-139. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00123-1>
- Lal, R. (2023). *Soil erosion and its impact on soil fertility*. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(1), 13-25.
- Lal, R. (2020). *Soil conservation and ecosystem services*. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 245-259. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.003>

- Lal, R. (2021). *Managing soil carbon for enhancing productivity and mitigating climate change*. Soil and Tillage Research, 213, 105167. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105167>
- Lal, R. (2016). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainable Agriculture Reviews*, 15, 1-20.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). *The contentious nature of soil organic matter*. Nature, 528(7580), 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Leakey, R.R.B. (2017). *Agroforestry: A Global Land-Use Perspective*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58792-7>
- Lee, C. "Soil Erosion in Forestry: Impacts and Mitigation." *Forestry Research Bulletin*, 2022.
- Liu, Y., Wang, J., & Zhang, Q. (2022). *The role of organic amendments in improving soil fertility and structure*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 341, 108192.
- Luo, Z., et al. (2020). *Influence of long-term organic matter addition on soil organic carbon dynamics in agricultural soils*. Soil Science Society of America Journal, 84(3), 745-755. <https://doi.org/10.1002/saj2.20053>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd Ed.). Elsevier.
- Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Paul, E. A., & Clark, F. E. (2016). *Soil Microbiology and Biochemistry*. CRC Press.
- Marschner, P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- Mendoza, M. L., et al. (2020). The impact of phosphorus application on crop yield. *Agronomy Journal*, 112(3), 1234-1245.
- Mbow, C., et al. (2019). *Agroforestry as a solution to enhance soil health and food security under climate change in Africa*. In *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 41: 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.09.005>
- McKenzie, R. A., et al. (2021). The benefits of organic fertilizers in sustainable agriculture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 101-110.
- McKenzie, R. A., et al. (2021). Soil testing for improving agricultural sustainability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 134-145.
- Manna, M. C., et al. (2020). Soil physical properties and water retention. *Geoderma*, 377, 114535.

- Miller, A. "Water Retention and Soil Quality in Forest Management." *Forest Hydrology Journal*, 2023.
- Miller, T., Carter, J., & White, P. (2020). *Conservation Agriculture in Forestry Systems*. Routledge.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Longman.
- Mutuo, P. K., et al. (2021). Nitrogen Fixation in Agroforestry Systems: Harnessing the Potential for Enhanced Soil Fertility. *Global Environmental Change*, 56, 101936.
- Musvoto, G.G., et al. (2017). *Unlocking the benefits of sustainable soil management for climate-resilient agriculture in Africa*. In *Soil and Tillage Research*, 175, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.007>
- Mutuo, P. K., et al. (2021). "Nitrogen Fixation in Agroforestry Systems: Harnessing the Potential for Enhanced Soil Fertility." *Global Environmental Change*, 56, 101936.
- Nair, P.K.R. (2021). *Agroforestry systems and environmental quality: introduction*. *Agroforestry Systems*, 95(1), 1-5. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00634-5>
- Nguyen, T. "Ecological Functions of Forest Soils." *Environmental Studies Quarterly*, 2022.
- Paul, E. A., & Clark, F. E. (2016). *Soil Microbiology and Biochemistry*. CRC Press.
- Paul, E. A. (2014). *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry* (4th ed.). Academic Press.
- Patel, S. "The Role of Soil Fertility in Disaster Prevention in Forested Areas." *Natural Hazards Review*, 2023.
- Peterson, R., et al. (2022). "Integrating Tissue Analysis and Soil Testing for Optimal Fertilizer Recommendations." *Agronomy Journal*. Vol 114, No. 4, pp. 957-965.
- Perez, J., Gomez, R., & Roberts, L. (2021). "Mulching for Soil Conservation in Forest Lands." *Forestry Innovation Journal*, 15(2), 45-59.
- Pires, M., da Silva, F., & Coelho, R. (2020). "Composting for Soil Health in Forestry." *Soil Science Today*, 12(1), 98-106.
- Pimentel, D., et al. (2018). Erosion and the loss of soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4), 114A-118A.
- Pittelkow, C.M., et al. (2015). *When does no-till farming yield more? A global meta-analysis*. In *Field Crops Research*, 183, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>

- Powlson, D. S., et al. (2016). The role of rotation in sustainable agriculture. *Nature Plants*, 2(5), 16070.
- Ramaekers, L., et al. (2020). "Precision agriculture and plant health: A modern approach". *Agricultural Systems*, 185, 102940.
- Rafiq, M., et al. (2021). The role of potassium in improving crop resilience. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(1), 25-40.
- Reddy, S. S., et al. (2019). "Balanced fertilization for higher productivity and sustainability". *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 115(2), 215-226.
- Roberts, J. "Economic Impact of Soil Fertility in Commercial Forestry." *Journal of Forest Economics*, 2022.
- Rodriguez, M., & Patel, D. (2022). "Land Rotation and Soil Recovery in Forest Ecosystems." *Ecological Forestry*, 62(3), 320-335.
- Roy, P., et al. (2020). "Nutrient dynamics and management in crop production". *Advances in Agronomy*, 160, 145-188.
- Ryan, J., et al. (2017). Soil fertility and nutrient management. *Agronomy Journal*, 109(4), 1466-1477.
- Rayment, G. E., & Higginson, F. R. (2016). *Soil Chemical Methods: Australasia*. CSIRO Publishing.
- Sayer, J., et al. (2017). Nutrient cycling in tropical forests: An overview. *Tropical Forest Ecology*, 21(4), 521-534.
- Sainju, U. M., et al. (2018). Long-term effects of soil management practices on soil health and crop yield. *Agronomy Journal*, 110(6), 2634-2644.
- Schulte, R., et al. (2022). "Macro and Micronutrient Deficiencies in Crops: Diagnostic and Management Practices." *Agricultural Science and Technology Journal*. Vol 27, No. 4, pp. 567-583.
- Schmidt, M. W. I., et al. (2019). Persistence of soil organic carbon in a changing climate. *Nature Geoscience*, 12(11), 1031-1037.
- Scherr, S. J., & McNeely, J. A. (2008). *Biodiversity Conservation and Agricultural Sustainability: A Global Perspective*. IUCN

- Sharma, K., Li, X., & Davis, M. (2023). *Soil Water Retention and Agricultural Impacts*. *Journal of Soil Science*, 92(3), 456-473.
- Sibley, J. L., & Harris, A. R. (2021). Advances in Remote Sensing Technologies for Monitoring Soil Nutrients. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(3), 319-327.
- Singh, R., et al. (2023). "Technological advancements in site-specific nutrient management". *Precision Agriculture*, 24(1), 1-20.
- Six, J., et al. (2004). The role of soil organic matter in maintaining soil structure. *Soil & Tillage Research*, 79(2), 45-54.
- Smith, J., et al. "Forest Soil Fertility and Biodiversity." *Journal of Environmental Science*, vol. 12, no. 4, 2023.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2010). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press.
- Smith, P., et al. (2020). *Restoration of degraded lands through reforestation and its effects on soil carbon stocks*. *Global Change Biology*, 26(4), 1256-1265. <https://doi.org/10.1111/gcb.15056>
- Smith, J., Thompson, G., & Evans, K. (2023). *Soil Rehabilitation Techniques in Degraded Forests*. Elsevier.
- Smith, P., et al. (2023). "Micronutrients and Plant Stress Tolerance: Advances in Understanding and Applications in Agriculture." *Plant Physiology Journal*. Vol 58, No. 3, pp. 233-247.
- Smith, L. & Thompson, R. (2022). "Impact of Biodiversity on Soil Nutrient Dynamics in Managed Forests." *Soil Biology & Biochemistry*, 149, 107979.
- Smith, P., et al. (2020). *Climate change and soil carbon: Implications for global food security*. In *Advances in Agronomy*, 163, 1-45. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.07.003>
- Smith, J., et al. (2021). "Nutrient Dynamics in Forest Ecosystems." *Journal of Ecological Studies*, 32(4), 220-240.
- Smith, P., et al. (2021). *The role of sustainable soil management in climate change adaptation and mitigation*. *Nature Food*, 2, 872-880. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00333-3>
- Sparks, D. L. (2019). *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America.
- Sutherland, R. A., et al. (2020). Deforestation and erosion in tropical environments. *Environmental Management*, 65(1), 1-10.

- Sutton, M.A., et al. (2019). *Nitrogen challenges and opportunities: Assessing the impacts of excess nitrogen*. In *Environmental Science & Technology*, 53(16), 9276-9285. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01972>
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). *Principles and Applications of Soil Microbiology* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall
- Teasdale, J. R., et al. (2015). Cover crops and sustainable agriculture: a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 203, 89-99.
- Thornton, P. K., et al. (2018). Climate smart agriculture: Science and practice. *Nature Climate Change*, 8(2), 146-154.
- Tiessen, H., et al. (2016). The role of phosphorus in agriculture. *Agricultural Systems*, 142, 83-90.
- Van Noordwijk, M., et al. (2018). *Rehabilitation of degraded lands in tropical forests: Leveraging payments for environmental services and agroforestry*. In *World Development*, 104, 203-215.
- van Straaten, O., et al. (2015). *Agroforestry systems as a tool for restoration of degraded landscapes in the tropics*. *Agroforestry Systems*, 89(6), 1035-1050. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9831-9>
- Vitousek, P., et al. (2013). Nutrient imbalances in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(20), 8342-8347.
- Walling, D. E., & Fang, D. (2009). Recent trends in the erosion and sediment yield of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 69(1-2), 175-186.
- White, P.J., et al. (2023). "Plant Nutrient Deficiencies and Their Visual Symptoms." *Plant and Soil Journal*. Vol 489, No. 1, pp. 123-139.
- Weil, R.R., & Brady, N.C. (2017). **The Nature and Properties of Soils** (15th Ed.). Pearson.
- Williams, D., & Clark, M. "Nutrient Cycling in Forest Ecosystems." *Ecology Today*, 2023.
- Williams, R. & Johnson, L. (2021). "Soil Microorganisms and Forest Fertility." *Environmental Soil Biology*, 24(3), 210-229.
- Xu, M., et al. (2019). Organic matter content and soil fertility. *Soil Science Society of America Journal*, 83(1), 150-162.

- Yamani, A. (2018). Telaah Kesuburan Tanah Pada Hutan Alam Di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) ULM. *Jurnal Hutan Tropis*. Vol 6 no 1. e-ISSN 2337-7992. <https://ppjp.ulm.ac.id/journal/index.php/jht/article/view/5098/4370>
- Zhang, Y. "Soil Carbon Sequestration in Forest Ecosystems." *Carbon and Climate Journal*, 2023.
- Zhang, X., et al. (2020). *Precision Agriculture Technologies for a Sustainable Future*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 121. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00121>
- Zhang, X., et al. (2021). *Excessive nitrogen fertilization reduces soil microbial diversity and alters ecosystem function*. *Nature Communications*, 12(1), 430. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20467-0>
- Zhang, Y., et al. (2021). "Site-specific nutrient management for sustainable crop production". *Field Crops Research*, 272, 108261.
- Zhang, Y., et al. (2018). Biodiversity and ecosystem stability in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 411, 72-79.
- Zhang, Y., et al. (2017). The effect of global warming on soil organic carbon. *Global Change Biology*, 23(8), 3180-3191.
- Zhou, W., et al. (2022). "Nitrogen management and environmental implications: A global perspective". *Environmental Science & Technology*, 56(4), 2345-2358.
- Zhao, Y., et al. (2019). Drought impact on crop yield in different regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266, 67-75.
- Zhang, X., et al. (2021). *Excessive nitrogen fertilization reduces soil microbial diversity and alters ecosystem function*. *Nature Communications*, 12(1), 430. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20467-0>
- Zhou, Z., Ma, Y., & Chen, L. (2020). "Terracing for Erosion Control in Forest Hills." *Soil Erosion Review*, 29(4), 76-85.
- Zornoza, R., et al. (2021). Soil pH and its impact on nutrient availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108218.
- Zhu, Q., et al. (2020). *The importance of soil microbial diversity in agroecosystems and its management through sustainable agricultural practices*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 301, 107032. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107032>

GLOSARIUM

- **Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan:** Rencana global yang dirancang oleh PBB untuk mencapai pembangunan berkelanjutan di berbagai sektor, termasuk pengelolaan lahan.
- **Agroforestri:** Sistem pertanian yang mengintegrasikan pohon dengan tanaman pertanian atau peternakan untuk meningkatkan keanekaragaman hayati dan kesuburan tanah.
- **Agregat Tanah:** Kumpulan partikel tanah yang membentuk struktur tanah.
- **Aerasi:** Sirkulasi udara di dalam tanah yang penting untuk respirasi akar dan mikroorganisme tanah.
- **Aluminium Larut:** Bentuk aluminium yang dapat terlarut di tanah dan menjadi toksik bagi tanaman dalam kondisi pH asam.
- **Auksin:** Hormon pertumbuhan yang mengatur pembelahan sel dan perpanjangan sel.
- **ATP (Adenosin Trifosfat):** Molekul energi utama yang digunakan oleh sel untuk menjalankan berbagai proses biologis.
- **Bahan Organik:** Material berasal dari sisa-sisa makhluk hidup yang terdekomposisi dalam tanah.
- **Bahan Organik Tanah:** Sisa-sisa organisme yang terurai di dalam tanah, yang berperan penting dalam menyediakan nutrisi dan memperbaiki struktur tanah.
- **Biofertilizer:** Pupuk hayati yang mengandung mikroorganisme hidup untuk meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.
- **Biochar:** Bahan kaya karbon yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa dan digunakan sebagai amandemen tanah.
- **Controlled-release fertilizers:** Pupuk yang dirancang untuk melepaskan nutrisi
- **Dekomposisi:** Proses pemecahan bahan organik oleh mikroorganisme menjadi bentuk nutrisi yang dapat diserap oleh tanaman.

- **Diversifikasi:** Strategi dalam pertanian untuk menanam berbagai jenis tanaman atau memanfaatkan berbagai sumber daya dari satu lahan untuk mengurangi risiko ekonomi.
- **Erosi:** Hilangnya lapisan tanah atas akibat aliran air atau angin, yang mengakibatkan menurunnya kesuburan tanah.
- **Erosi tanah:** Proses hilangnya lapisan atas t t aksi angin, air, atau aktivitas manusia.
- **Eutrofikasi:** Proses peningkatan nutrisi, terutama nitrogen dan fosfor, di yang menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan.
- **Fertigasi:** Sistem yang menggabungkan pemupukan dan irigasi, di mana pupuk diberikan melalui sistem pengairan.
- **Foliar spraying:** Aplikasi pupuk atau nutrisi langsung ke daun tanaman.
- **Fotosintesis:** Proses biokimia di mana tanaman menggunakan cahaya untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa.
- **Fotolisis Air:** Proses pemecahan molekul air menjadi oksigen dan hidrogen selama fotosintesis.
- **Fiksasi Nitrogen:** Proses di mana nitrogen dari atmosfer diubah menjadi senyawa nitrogen yang dapat diserap oleh tanaman, seperti amonia.
- **Humus:** Materi organik hasil dekomposisi tumbuhan dan hewan di tanah yang sering dianggap sebagai sumber nutrisi.
- **Hukum Minimum Liebig:** Prinsip yang menyatakan bahwa pertumbuhan tanaman dibatasi oleh unsur hara yang tersedia dalam jumlah paling sedikit.
- **Infiltrasi:** Proses penyerapan air ke dalam tanah melalui pori-pori tanah.
- **Kapasitas Menahan Air:** Kemampuan tanah untuk mempertahankan air di dalam profil tanah setelah hujan atau irigasi.
- **Kapasitas Tukar Kation (KTK):** Kemampuan tanah untuk menahan dan menyediakan kation (ion bermuatan positif) yang berguna bagi tanaman, seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan kalium (K^{+}).
- **Kedalaman Efektif:** Lapisan tanah yang dapat ditembus oleh akar tanaman untuk mendapatkan air dan nutrisi.

- **Kation:** Ion bermuatan positif, seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}), yang mempengaruhi struktur dan kesuburan tanah.
- **Kerdil:** Pertumbuhan tanaman yang terhambat, sering kali disebabkan oleh kekurangan nutrisi.
- **Keseimbangan Hara:** Kondisi ketika jumlah nutrisi yang dibutuhkan oleh ekosistem tersedia dalam jumlah yang memadai untuk mendukung pertumbuhan dan fungsi organisme yang hidup di dalam
- **Kjeldahl Method:** Metode untuk menentukan kandungan nitrogen dalam jaringan organik.
- **Klorosis:** Kegagalan daun untuk memproduksi klorofil sehingga menyebabkan warna kuning atau pucat.
- **Kompaksi tanah:** Pengurangan porositas tanah akibat tekanan, yang menyebabkan tanah menjadi padat dan sulit ditembus oleh air dan akar tanaman.
- **Konservasi tanah dan air:** Praktik pengelolaan yang bertujuan untuk menjaga kelembaban dan stabilitas tanah, serta mencegah erosi.
- **Leaching (Pencucian):** Hilangnya nutrisi dari lapisan atas tanah akibat pergerakan air.
- **Legum:** Jenis tanaman seperti kacang-kacangan yang mampu mengikat nitrogen dari udara dan menyimpannya dalam tanah melalui simbiosis dengan bakteri.
- **Lignin:** Polimer organik yang menguatkan dinding sel tanaman.
- **Litterfall (Serasah):** Material organik yang jatuh dari tumbuhan ke tanah, seperti daun dan ranting.
- **Makronutrien:** Unsur hara utama yang diperlukan dalam jumlah besar oleh tanaman, seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K).
- **Mikroorganisme:** Organisme mikroskopis seperti bakteri, jamur, dan protozoa yang berperan dalam dekomposisi dan siklus hara.
- **Mikoriza:** Jamur yang membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman untuk meningkatkan penyerapan hara, terutama fosfor.
- **Monokultur:** Sistem penanaman satu jenis tanaman dalam skala luas, sering digunakan di hutan tanaman komersial.

- **Mineralisasi nitrogen:** Proses di mana nitrogen organik diubah menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman, seperti amonium (NH_4^+) atau nitrat (NO_3^-).
- **Minimal Tillage:** Pengolahan tanah minimal untuk menjaga struktur tanah dan mencegah erosi.
- **Mikoriza:** Fungi yang hidup bersimbiosis dengan akar tanaman, membantu penyerapan air dan nutrisi.
- **Mulsa:** Lapisan penutup tanah yang terbuat dari bahan organik atau anorganik untuk menjaga kelembaban tanah dan mengendalikan gulma.
- **Nutrisi:** Unsur kimia yang dibutuhkan tanaman untuk pertumbuhan, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium.
- **Nekrosis:** Kematian sel atau jaringan yang menyebabkan perubahan warna coklat atau hitam pada daun atau batang.
- **Nanofertilizer:** Pupuk yang menggunakan teknologi nano untuk meningkatkan efisiensi penyerapan hara oleh tanaman.
- **Nanoteknologi:** Teknologi yang menggunakan partikel berskala nano untuk meningkatkan efisiensi dan kontrol dalam berbagai aplikasi, termasuk pemupukan.
- **Nekrosis:** Kematian jaringan tanaman yang ditandai dengan bercak coklat atau hitam.
- **Nitrogen:** Unsur kimia esensial yang dibutuhkan untuk pembentukan protein dalam organisme hidup.
- **Nitrogen Fixation (Pengikatan Nitrogen):** Proses di mana mikroorganisme atau tanaman leguminosa mengikat nitrogen dari udara dan mengubahnya menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman.
- **Pemupukan berimbang (Balanced Fertilization):** Metode pemupukan yang memberikan nutrisi kepada tanaman dalam jumlah yang tepat sesuai dengan kebutuhan tanaman.
- **Pemupukan Presisi:** Teknologi pemupukan yang memanfaatkan data real-time dari sensor untuk mengoptimalkan penggunaan pupuk sesuai dengan kebutuhan tanaman dan kondisi tanah.

- **Pupuk pelepas lambat:** Jenis pupuk yang melepaskan nutrisi secara perlahan dalam jangka waktu yang panjang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan.
- **Pupuk organik:** Pupuk yang berasal dari bahan alami seperti kompos atau sisa tanaman yang digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah.
- **Payment for Environmental Services (PES):** Skema insentif di mana petani atau pemilik lahan mendapatkan pembayaran atas tindakan konservasi yang dilakukan untuk melindungi lingkungan.
- **pH Tanah:** Derajat keasaman atau kebasaan tanah yang mempengaruhi ketersediaan unsur hara.
- **Pelapukan:** Proses pemecahan batuan menjadi partikel tanah melalui pengaruh cuaca dan organisme.
- **Pencucian nitrogen:** Hilangnya nitrogen dari tanah akibat curah hujan yang intens, yang mengalirkan nitrogen ke dalam air tanah atau sungai.
- **Pengapuran:** Penambahan kapur (CaCO_3) ke tanah untuk menaikkan pH tanah yang asam.
- **Precision farming:** Sistem pertanian berbasis teknologi untuk memantau dan
- **Porositas Tanah:** Persentase volume tanah yang terdiri atas ruang kosong, memungkinkan masuknya air dan udara.
- **Pemanenan terpadu:** Teknik penebangan hutan yang meminimalkan dampak terhadap tanah dan lingkungan sekitarnya.
- **Rotasi tanaman:** Pergantian jenis tanaman yang ditanam di suatu lahan untuk meminimalkan penipisan nutrisi tanah.
- **Reboisasi:** Proses penanaman kembali hutan di lahan yang telah gundul atau terdegradasi.
- **Rehabilitasi lahan:** Proses pemulihan tanah yang terdegradasi untuk mengembalikan fungsi ekologis dan produktivitasnya.
- **Resiliensi:** Kemampuan suatu ekosistem untuk pulih setelah mengalami gangguan.
- **Retensi air:** Kemampuan tanah untuk menyimpan air di dalam pori-porinya.
- **Rotasi Tanaman:** Pergantian jenis tanaman yang ditanam di satu lahan dari satu musim ke musim lainnya untuk menjaga kesuburan tanah.

- **Salinitas:** Kandungan garam dalam tanah, yang mempengaruhi ketersediaan air dan nutrisi bagi tanaman.
- **Sensor agrikultur:** Alat yang digunakan untuk mendeteksi status nutrisi dan kesehatan tanaman secara langsung melalui teknologi canggih.
- **Serasah (Litterfall):** Material organik seperti daun, ranting, dan buah yang jatuh dari pohon ke lantai hutan.
- **Siklus hidrologi:** Proses pergerakan dan penyimpanan air dalam ekosistem melalui hujan, penyerapan, dan penguapan.
- **Simbiosis:** Hubungan saling menguntungkan antara dua organisme, misalnya antara tanaman legum dan bakteri pengikat nitrogen.
- **Struktur Tanah:** Susunan partikel tanah yang membentuk agregat.
- **Satelit pertanian:** Penggunaan satelit untuk memantau kondisi lahan pertanian secara luas dan real-time.
- **Spektroskopi Emisi Plasma (ICP-OES):** Teknik analisis untuk mendeteksi berbagai elemen secara simultan dengan sensitivitas tinggi.
- **Spektroskopi Serapan Atom (AAS):** Teknik untuk mengukur konsentrasi unsur-unsur logam dalam sampel tanaman atau tanah.
- **Tanaman penutup tanah:** Tanaman yang ditanam untuk melindungi permukaan tanah dari erosi dan meningkatkan kandungan bahan organik.
- **Tekstur Tanah:** Proporsi relatif dari partikel pasir, debu, dan lempung dalam tanah.
- **Tekanan Osmotik:** Kekuatan yang mendorong aliran air melalui membran semipermeabel, penting untuk keseimbangan air dalam sel tanaman.
- **Toksisitas:** Kondisi dimana zat-zat tertentu, seperti aluminium atau mangan, menjadi racun bagi tanaman.
- **Tulang Daun:** Pembuluh darah utama di daun yang membawa air dan nutrisi.
- **Unsur Hara Mikro:** Nutrisi yang diperlukan dalam jumlah kecil oleh tanaman, seperti besi dan mangan.
- **Unsur hara:** Nutrisi yang diperlukan tanaman untuk tumbuh, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium.

- **Uji Tanah:** Analisis kimiawi yang digunakan untuk menilai kadar hara dan karakteristik fisik tanah.

INDEKS

	A		H
aerasi, 39		hara makro, 20	
agregat, 40		hara mikro, 20	
Aktivitas Biologis , 40		Hormon tanaman, 36	
alfisol, 1		humus, 20	
Aliran massa, 33		hutan, 6	
Analisis jaringan , 29			I
aridisol, 1		ifusi, 34	
	B	iklim, 7	
bahan induk, 1, 14		infiltrasi, 41	
bakteri, 42		inseptisol, 1	
besi, 22		Interpretasi , 30	
	C	Intersepsi Akar, 34	
<i>cotransporter</i> , 35			J
	D	jasad hidup, 1	
degradasi, 15			K
dekomposisi, 120		Kahat , 31	
diagnosis, 21		kalium, 22	
drainase, 39		kapasitas tanah, 5	
	E	Kapasitas tukar kation, 10	
ekosistem, 6		karbon, 6	
ekosistem hutan, 6		keanekaragaman hayati, 67	
Endosimbiosis , 36		Kecukupan Hara , 30	
energi metabolik, 35		Kedalaman tanah, 9	
entisol, 1		Kekurangan Hara , 30	
erosi, 40		Kelebihan Hara , 30	
	F	kesuburan kimiawi, 2	
fosfor, 22		kesuburan biologi, 2	
	G	Kesuburan Tanah , 1	
Gejala visual, 31		Kjeldahl Method , 29	
Genesa tanah, 13		kolaborasi, 120	

kompos, 41

L

leguminosa, 116

M

mangan, 22

Mekanisme, 33

Mikoriza, 11, 36

mikroba, 21

mikrobiologi tanah, 11

mikroorganisme, 11

mikroorganisme pengurai, 39

mikrovet, 78

molisol, 1

N

nanofertilizer, 21

nitrogen, 22

nutrisi, 68

Nutrisi, 5

O

oksisol, 1

ordo tanah, 1

P

pedogenesis, 13

Pelapukan fisik, 13

Pelapukan kimia, 13

pemupukan, 10

pengelolaan tanah, 7

pestisida, 11

pH tanah, 10

Porositas tanah, 9

porous, 39

Produktivitas, 2

pupuk, 7

pupuk sintetis, 21

R

rehabilitasi, 119

Remote Sensing, 23

reproduksi, 22

respirasi, 41

Retensi Air, 39

Revegetasi, 116

S

siklus hidrologi, 5

Spektrofotometri Serapan Atom (AAS),
29

Spektroskopi, 21

Spektroskopi Emisi Plasma (ICP-OES),
29

spodosol, 1

Status Unsur Hara, 23

Struktur tanah, 6, 9

symporter, 35

T

Tanah, 1

Tekstur tanah, 9

tembaga, 22

Tissue Testing, 23

Topografi, 14

U

ultisol, 1

unsur hara, 1

V

vertisol, 1

W

waktu, 14