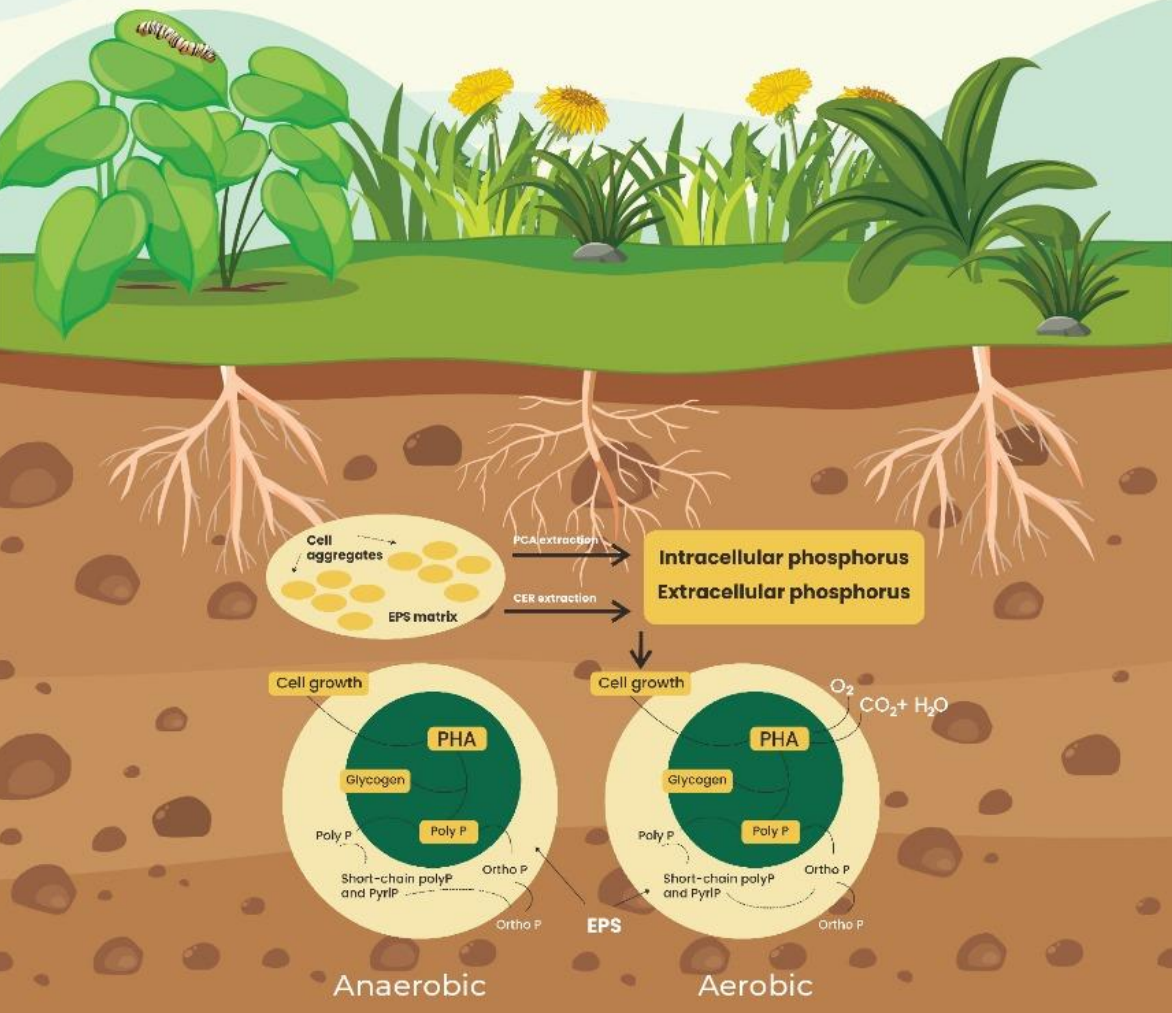


PERANAN DAN DINAMIKA BAHAN ORGANIK TANAH

FADLY HAIRANNOOR YUSRAN



PERANAN DAN DINAMIKA BAHAN ORGANIK TANAH

FADLY HAIRANNOOR YUSRAN



PERANAN DAN DINAMIKA BAHAN ORGANIK TANAH

Penulis:

Fadly Hairannoor Yusran

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 - V + 50 hal, 15,5 × 23 cm

Cetakan Pertama. ... 2024

ISBN: ...

KATA PENGANTAR

Pertama, marilah kita panjatkan segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua, sehingga buku ini bisa terwujud dalam pegangan kita. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada baginda Rasulullah Nabi Muhammad SAW, beserta sahabat dan para pengikutnya hingga akhir zaman.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, perkenankanlah saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada Pimpinan Universitas Lambung Mangkurat yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk mewujudkan buku ini. Buku ini, sedikit banyak, merupakan perjalanan hidup pribadi penulis, baik sebagai siswa, mahasiswa, maupun anggota masyarakat biasa yang mencintai lingkungannya.

Penulis berharap semoga buku ini dapat memberikan inspirasi kepada pembacanya dan dapat meningkatkan rasa memiliki serta memelihara alam agar kita bisa mewariskannya kepada generasi mendatang.

Aamiin, yaa rabbal'aalamiin.

Banjarbaru, April 2024.

Penulis

PRAKATA

Pengalaman sebagai pengajar dan peneliti ilmu tanah, baik tingkat nasional maupun internasional, membuat perjalanan karier di bidang ini layak untuk dituangkan dalam sebuah buku. Buku ini juga merupakan rangkuman idealisme kita terhadap alam dengan latar belakang sebagai berikut:

Pertama, buku ini merupakan ekspresi adalah kekurangan kita terhadap peranan karbon (C) dalam kehidupan sehari-hari, termasuk di dalamnya adalah peran C dalam bidang ilmu yang kita geluti.

Kedua, hilangnya bahan organik tanah karena erosi dan mineralisasi atau dekomposisi intensif yang diyakini menjadi penyebab degradasi tanah mendatangkan akibat buruk lain pada sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Oleh karena itu, usaha konservasinya adalah salah satu tujuan dari sistem pertanian berkelanjutan. Apalagi bila dihubungkan dengan pembangunan di segala bidang yang kita lakukan sekarang ini. Perluasan lahan pertanian sering bertabrakan dengan tekanan perkembangan penduduk. Akibatnya, tanah-tanah marginal miskin sering menjadi alternatif perluasan. Hal ini tentu saja memerlukan pengetahuan khusus untuk menjamin produktivitas tanah yang terus-menerus.

Ketiga, kesadaran yang sudah jauh lebih besar tentang peranan C secara global. Apalagi kalau sudah berhubungan dengan pemanasan alam yang mulai kita rasakan efek negatifnya pada kehidupan kita. Negara maju dan negara berkembang, bahkan negara miskin saling menyalahkan satu sama lain karena adanya anomali iklim sekarang ini. Perhatian kita hanya tercurah pada konsentrasi C dalam skala besar. Kita abai dengan peranan C di dalam tanah. Oleh karena itu, harusnya kita tidak akan tega menginjak rumput di mana pun, apalagi memamatkannya.

SINOPSIS

Bahan organik tanah menjadi komponen vital dalam kesehatan dan kesuburan tanah. Buku ini menelusuri peranan penting dan dinamika yang melibatkan bahan organik tanah dalam ekosistem pertanian dan lingkungan alam. Penulis menggali berbagai aspek, mulai dari dekomposisi materi organik hingga interaksi dengan mikroorganisme tanah, serta dampaknya terhadap siklus nutrisi tanaman.

Dalam buku ini, pembaca akan diajak untuk memahami betapa kompleksnya jaringan ekologi tanah, di mana bahan organik menjadi penopang utama dalam menjaga kestabilan struktur tanah dan retensi air. Selain itu, buku ini juga membahas peran bahan organik dalam mitigasi perubahan iklim, termasuk perannya dalam menyimpan karbon dan mempengaruhi siklus karbon di tanah.

Melalui penelusuran yang mendalam dan ilmiah, pembaca akan diperkenalkan dengan konsep-konsep penting seperti mineralisasi, humifikasi, dan siklus C. Buku ini tidak hanya mengulas teori, tetapi juga memberikan contoh aplikatif dalam praktik pertanian berkelanjutan serta strategi pemeliharaan tanah yang berbasis ilmiah.

"Peranan dan Dinamika Bahan Organik Tanah" adalah panduan yang penting bagi para petani, ilmuwan pertanian, mahasiswa, dan siapa pun yang tertarik memahami kompleksitas hubungan antara bahan organik tanah dan kesehatan ekosistem pertanian serta lingkungan.

1 DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| KATA PENGANTAR..... | iv |
| PRAKATA..... | v |
| SINOPSIS..... | vi |
| 1 DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | ix |
| 2 PENDAHULUAN | 1 |
| 2.1 Bahan Organik Tanah..... | 1 |
| 2.2 Apa itu Karbon? | 5 |
| 2.3 Siklus Karbon..... | 7 |
| 2.3.1 Siklus Cepat | 8 |
| 2.3.2 Siklus Lambat | 12 |
| 2.4 Pemanasan Global..... | 14 |
| 3 KLASIFIKASI BAHAN ORGANIK TANAH..... | 20 |
| 3.1 Bahan organik aktif..... | 21 |
| 3.2 Bahan organik resistan | 24 |
| 4 HILANGNYA BAHAN ORGANIK TANAH..... | 29 |
| 4.1 Lahan laterit dan sub-optimal..... | 31 |
| 4.2 Strategi pengelolaan | 32 |
| 5 MANFAAT BAHAN ORGANIK TANAH..... | 37 |
| 5.1 Amendemen Organik..... | 39 |
| 5.2 Pengaruhnya terhadap Sifat Tanah..... | 42 |
| 5.3 Pengaruhnya terhadap Unsur Hara..... | 43 |
| 6 DEKOMPOSISI DAN PERSISTENSI..... | 46 |
| 6.1 Umur Bahan Organik Tanah | 46 |
| 6.2 Hilangnya Bahan Organik Tanah Baru..... | 47 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.3 | <i>Priming Effect</i> | 48 |
| 7 | SIKLUS FOSFOR DALAM HUBUNGANNYA DENGAN BAHAN ORGANIK TANAH | 51 |
| 7.1 | Disolusi dan Presipitasi | 53 |
| 7.2 | Sorpsi dan Desorpsi..... | 53 |
| 7.3 | Fosfor Organik | 55 |
| 7.3.1 | Faktor Ketersediaan | 56 |
| 7.3.2 | Fosfor Biomassa Mikroba | 57 |
| 7.3.3 | Fosfatase..... | 58 |
| 7.3.4 | Bahan Organik Baru dan Lama | 60 |
| 7.3.5 | Perpindahan fosfat | 60 |
| 7.3.6 | Pencucian Fosfor..... | 61 |
| 8 | ISU KEKINIAN DALAM BAHAN ORGANIK TANAH | 64 |
| 8.1 | Dampak perubahan iklim pada bahan organik tanah | 64 |
| 8.2 | Bahan organik dan kesehatan tanah..... | 65 |
| 8.3 | Penyerapan karbon dan bahan organik tanah | 66 |
| 8.4 | Kontribusi mikroba terhadap bahan organik tanah..... | 67 |
| 8.5 | Arangbio dan bahan organik tanah | 68 |
| 8.6 | Topik penelitian terbaru | 69 |
| 9 | BUTIR SIMPULAN..... | 74 |
| 9.1 | Garis Besar | 74 |
| 9.2 | Kesimpulan..... | 76 |
| | DAFTAR PUSTAKA | 78 |
| | GLOSARIUM | 81 |
| | INDEKS..... | 86 |
| | PROFIL PENULIS..... | 88 |

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1. Siklus bahan organik dan jalur proses yang mempengaruhinya. Sumber: Yusran, 2005.....3
- Gambar 2. Siklus karbon yang memperlihatkan gerakan karbon di antara daratan, udara, dan lautan. Angka berwarna kuning mewakili proses alami, angka merah merupakan kontribusi manusia dalam $Gt\ thn^{-1}$. Sumber: Riebeek, 2011.8
- Gambar 3. Siklus emisi dan sekuestrasi C di alam. Hubungan antara siklus C dan formasi senyawa organik. Di dalam tanaman, CO_2 dan air diubah dan air menjadi senyawa organik sebagai sumber energi.10
- Gambar 4. Selama fotosintesis, tanaman menyerap CO_2 dan sinar matahari untuk menghasilkan glukosa dan gula lainnya untuk membangun struktur tanaman. Proses ini merupakan dasar dari siklus C cepat. Adaptasi dari Sellers et al., 1995.....11
- Gambar 5. Beberapa perubahan alam yang berasal dari pemanasan global yang sudah terjadi. Sumber: myloview, 2024.16
- Gambar 6. Proses *coral bleaching* yang mengancam kehidupan biota laut secara keseluruhan. Sumber: National Ocean Services. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024.....18
- Gambar 7. Komponen bahan organik berdasarkan aktif dan pasifnya senyawa pembentuk.20
- Gambar 8. Klasifikasi sederhana bahan organik tanah menurut *United States of America Department of Agriculture*. ...22
- Gambar 9. Pembagian bahan organik tanah berdasarkan kelarutan dan unsur yang menyertainya.....23

| | | |
|------------|---|----|
| Gambar 10. | Gurun pasir yang bisa menjadi media tanam yang subur asal memenuhi komponen tanah ideal. Gambut dan air menjadi dua <i>input</i> paling penting..... | 26 |
| Gambar 11. | Gambut, salah satu fraksi stabil bahan organik tanah, di bawah mikroskop elektron. Tampak jelas struktur sel dari bahan tumbuhan asal. | 27 |
| Gambar 12. | Pemanfaatan jerami sebagai mulsa untuk tanaman porang..... | 33 |
| Gambar 13. | Strategi konservasi yang mencakup hampir semua aspek sifat dasar tanah (fisik, kimia, dan biologi) yang bisa ditemukan hampir di semua pelosok yang cocok untuk padi..... | 35 |
| Gambar 14. | Pengaruh bahan organik terhadap sifat fisik, kimia, dan biologi tanah merupakan kunci tercapainya kesuburan dan kesehatan tanah. | 38 |
| Gambar 15. | <i>Terra Preta</i> di Lembah Amazon merupakan contoh praktik yang baik untuk konservasi bahan organik tanah. Sumber: Anonymous, 2024..... | 41 |
| Gambar 15. | Ilustrasi hubungan antara kemasaman tanah (pH) dengan ketersediaan unsur hara. Sumber: Hartemink & Barrow, 2023..... | 45 |
| Gambar 16. | Ilustrasi perubahan fraksi C ketika terjadi penambahan bahan organik segar. Sumber: Nyle C. Brady, 2017..... | 49 |
| Gambar 17. | Siklus fosfor di dalam tanah berdasarkan klasifikasi pembentukannya. | 52 |
| Gambar 18. | Proses penyerapan fosfor di dalam bakteri pembersih fosfor pada yang dipakai pada instalasi pengolahan limbah. Sumber: Zhang et al., 2013.... | 58 |

Gambar 19. *Scanning Electron Microscope* dari arangbio jerami gandum. Sumber: Lu et al., 2016.68

Gambar 20. Sebaran polutan mikroplastik di lingkungan kita. Sumber: Ziani et al., 2023.....71

2 PENDAHULUAN

2.1 Bahan Organik Tanah

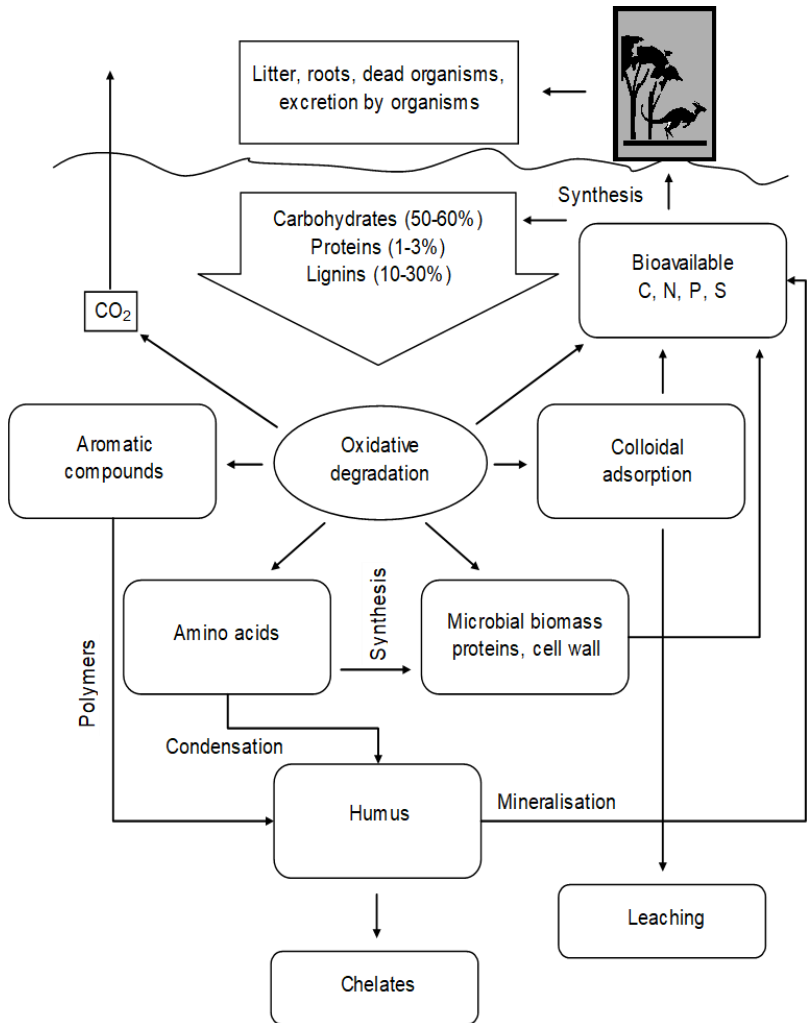
Bahan organik berasal dari terjemahan *organic matter* yang berarti bahan yang berasal dari makhluk hidup. Bahan organik tanah (BOT) bisa pula didefinisikan sebagai komponen tanah yang berasal dari hasil perombakan sisa-sisa flora dan fauna. Sisa flora seperti jaringan tumbuhan (akar, batang, dan daun) merupakan penyusun bahan organik tanah yang paling banyak. Sementara, sisa fauna hanya sebagian kecil dari volume keseluruhan. Bahan organik merupakan produk akhir dari proses dekomposisi yang menjadikannya resistan terhadap reaksi kimia susulan.

Bahan organik tanah merujuk pada material organik yang terdapat dalam tanah dalam berbagai tahap dekomposisi. Bahan organik tanah terdiri dari sisa-sisa tumbuhan dan hewan, mikroorganisme, dan bahan organik lainnya. Bahan organik tanah memainkan peran penting dalam kesehatan dan kesuburan tanah karena dapat mempengaruhi sifat fisik, kimia, dan biologi tanah.

Bahan organik tanah mempengaruhi kemampuan tanah untuk menahan air dan unsur hara, serta mempengaruhi struktur dan teksturnya. Bahan organik tanah juga memainkan peran penting dalam siklus C. Bahan organik tanah merupakan gudang C dalam tanah. Saat bahan organik terdekomposisi, unsur hara yang penting untuk pertumbuhan tanaman, seperti N, P, dan S menjadi tersedia bagi tanaman. Kadar bahan organik tanah dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk penggunaan lahan, praktik pengelolaan, iklim, dan jenis tanah. Praktik konservasi tanah, seperti pertanian tanpa olah tanah (TOT), penutup tanah, dan rotasi tanaman, dapat membantu meningkatkan kadar bahan organik dan meningkatkan kesehatan tanah.

Berdasarkan komposisi unsur penyusunnya, bahan organik dibagi atas C (44%), O (40%), H (8%), dan abu (8%). Sementara, menurut tipe senyawa yang dikandungnya, bahan organik dibagi atas karbohidrat (60%), lignin (25%), protein (10%), dan senyawa lemak, lilin, dan tanin (5%).

Berbicara tentang bahan organik secara lebih sistematis, kita harus mengenal siklusnya di alam ini. Gambar 1 memperlihatkan siklus bahan organik secara sederhana yang melibatkan proses seperti mineralisasi, imobilisasi, sistesis, polimerisasi, oksidasi-reduksi, dan lain-lain. Lebih rinci lagi bisa disebutkan kalau siklus bahan organik tidak lepas dari siklus C. Siklus C sekarang semakin sering dipelajari karena peranannya yang sangat besar pada gejala perubahan iklim global yang mempengaruhi semua aspek kehidupan. Bahkan mempengaruhi peradaban manusia di dunia ini. Walaupun demikian, konsentrasi bahan organik tanah sangat kecil bila dibandingkan dengan siklus C di alam. Volume bahan organik di dalam tanah sangat kecil (<5%), tetapi pengaruhnya terhadap sifat tanah sangat besar. Tidak mengherankan kalau bahan organik disebut kunci kesuburan tanah (Yusran et al., 2021).



Gambar 1. Siklus bahan organik dan jalur proses yang mempengaruhinya. Sumber: Yusran, 2005.

Kesadaran akan peranan C dalam kehidupan sehari-hari mesti kita sosialisasikan kepada orang-orang di sekitar kita. Cara paling jitu adalah memperkenalkan peranan C dalam kehidupan kita sehari-hari, dimulai dengan C yang mudah kita jelaskan sampai kepada C yang sulit dijelaskan.

Pengenalan yang penulis maksudkan adalah seperti menyadari bahwa C selalu bersentuhan dengan hidup kita. Tahukah kita bahwa *softdrinks* yang kita minum dengan sensasi

menusuk-nusuk lidah adalah modifikasi dari CO₂ yang kita hembuskan? Sadarkan kita kalau es kering yang sering kita lihat di panggung hiburan adalah bentuk padat dari CO₂ itu sendiri? Tidakkah kita sadar kalau tidak ada modifikasi C menjadi freon kita tidak kenal juga yang namanya kulkas?

Pengenalan lebih jauh akan sampai pada peranan C yang lebih besar seperti *global warming* yang kita takuti bersama, mengapa bisa terjadi demikian dan bagaimana cara mencegahnya? Semua itu akan melahirkan adanya kesadaran yang lebih tinggi terhadap apa dan bagaimana C mempengaruhi hidup kita.

Dari kenyataan ini, maka sangat penting untuk menyadari latar belakang kenapa bahan organik tanah ini besar pengaruhnya dalam peradaban pertanian kita sekarang. Adapun butir-butir utamanya adalah:

Pertama adalah kurang-tahuan kita terhadap peranan C dalam kehidupan sehari-hari, termasuk di dalamnya adalah peran C dalam bidang ilmu yang kita geluti.

Kedua, hilangnya bahan organik tanah karena erosi, mineralisasi, dan dekomposisi diyakini menjadi penyebab degradasi tanah. Hilangnya bahan organik ini bisa mendatangkan akibat buruk lain pada sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Oleh karena itu, usaha konservasi kandungan bahan organik tanah adalah salah satu tujuan dari sistem pertanian berkelanjutan, apalagi bila dihubungkan dengan pembangunan di segala bidang yang kita lakukan sekarang ini.

Bagi negara berkembang seperti kita, perluasan lahan pertanian sering bertabrakan dengan tekanan perkembangan penduduk. Akibatnya, tanah-tanah marjinal miskin sering menjadi alternatif perluasan. Hal ini tentu saja memerlukan pengetahuan khusus untuk menjamin produktivitas tanah yang terus-menerus.

Yang ketiga, kesadaran yang sudah jauh lebih besar tentang peranan C secara global. Apalagi kalau dihubungkan dengan *global warming* yang mulai kita rasakan efek negatifnya pada

kehidupan kita. Negara maju dan negara berkembang, bahkan negara miskin saling menyalahkan satu sama lain adanya anomali iklim sekarang ini. Perhatian kita hanya terfokus pada konsentrasi C dalam skala besar, sampai melahirkan istilah *carbon trade* atau perdagangan C. Akibatnya, kita seperti mengabaikan peranan C dalam skala yang lebih kecil, terutama C-organik, yang ada di dalam tanah. Padahal peranannya dalam siklus kehidupan tanaman tidak boleh diabaikan selama kita masih menggantungkan harapan pada hasil panen untuk mendapatkan energi. Oleh karena itu, sampai pada tingkat tertentu, menginjak rumput pun mestinya kita tidak akan tega kalau kita menghayati peranan C yang dikandungnya.

2.2 Apa itu Karbon?

Masih melekat dalam ingatan kita kalau C yang kenal pada awalnya hanyalah lembaran tipis berwarna hitam yang digunakan untuk menjiplak dan mengetik dengan mesin tik manual. Perkenalan selanjutnya adalah pada saat kita di Sekolah Menengah Atas, saat guru kimia kita memperkenalkan bahwa C itu adalah arang. Adapun yang lebih tua dari arang adalah bentukan alam yang kita kenal dengan batubara. Atau bentuk murni yang melewati fase waktu geologi milyaran tahun, yaitu intan.

Lebih jauh dengan C adalah pada saat kita memasuki jenjang pendidikan tinggi di universitas. Karbon mulai menampakkan perannya saat kita mengetahui kalau C adalah bagian dari bahan organik yang menjadi kunci kesuburan tanah. Walaupun demikian, peranan C bagi tanaman sering dilupakan begitu saja karena jumlahnya yang melimpah dan sangat mudah didapat dari udara. Karbon adalah salah satu unsur hara makro, tetapi tidak pernah kita kenal adanya pupuk C di dunia pertanian. Bersamaan dengan itu, walaupun C merupakan unsur terbanyak kedua di dalam tubuh kita setelah O, kita cenderung mengabaikannya

karena dengan sangat mudahnya kita mendapatkan C dari produk tanaman atau hewan yang kita makan.

Karbon berasal bahasa Latin *carbo* yang diterjemahkan menjadi *coal* dalam Bahasa Inggris atau batubara dalam Bahasa Indonesia. Karbon adalah unsur kimia dengan simbol C dan nomor atom 6. Ini bukan logam dan tetravalen—atomnya menyediakan empat elektron untuk membentuk ikatan kimia kovalen. Karbon ada pada kelompok 14 dari tabel periodik. Karbon menyusun sekitar 0,025% kerak bumi. Terdapat tiga isotop C yang terbentuk alami di bumi, ^{12}C dan ^{13}C yang stabil. Sedangkan ^{14}C adalah bersifat radioaktif, meluruh dengan waktu paruh sekitar 5.730 tahun. Karbon adalah salah satu dari sedikit unsur yang dikenal sejak zaman kuno.

Karbon adalah unsur paling melimpah ke-15 di kerak bumi, dan unsur paling melimpah keempat di alam semesta berdasarkan massa setelah H, He, dan O. Kelimpahan C, keanekaragaman senyawa organiknya yang unik, dan kemampuannya yang tidak biasa untuk membentuk polimer, memungkinkan unsur ini berfungsi sebagai unsur paling umum dari semua kehidupan yang ada. Karbon adalah unsur paling banyak kedua dalam tubuh manusia berdasarkan massa (sekitar 18,5%) setelah O.

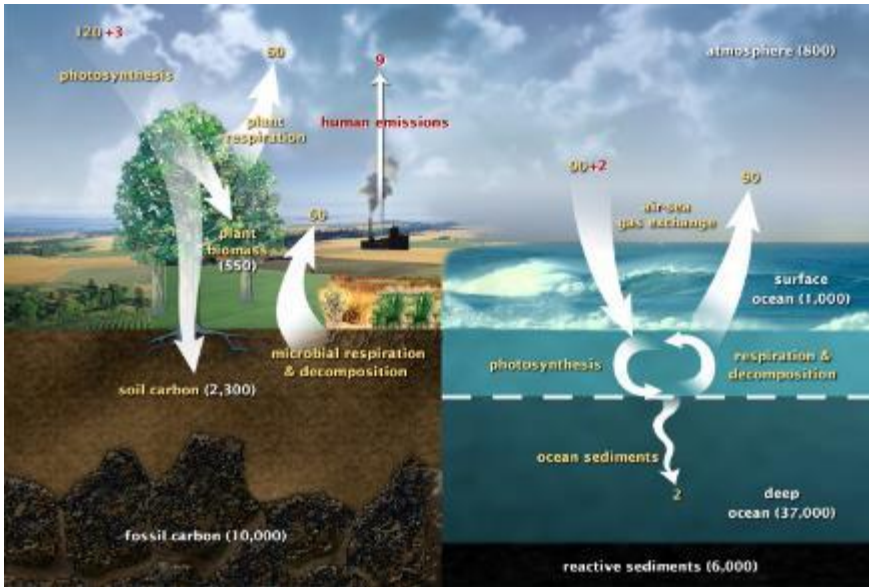
Atom-atom C dapat berikatan bersama dalam berbagai cara, menghasilkan berbagai alotrop C. Alotrop terkenal termasuk grafit, berlian, C amorf, dan *fullerene*. Sifat fisik C sangat bervariasi dengan bentuk alotropik. Misalnya, grafit buram dan hitam, sedangkan berlian sangat transparan. Grafit cukup lunak untuk membentuk goresan di atas kertas (karena itu namanya, dari kata kerja Yunani *graphe* yang berarti menulis), sedangkan intan adalah bahan alami yang paling keras yang diketahui. Grafit adalah konduktor listrik yang baik sedangkan intan memiliki konduktivitas listrik yang rendah. Dalam kondisi normal, berlian, tabung nano-C, dan *graphene* memiliki konduktivitas termal tertinggi dari semua materi yang ada. Semua alotrop C adalah padatan dalam kondisi normal. Grafit adalah bentuk paling stabil secara termodinamika pada suhu dan tekanan standar. Semuanya

tahan secara kimia dan memerlukan suhu tinggi agar bisa bereaksi bahkan dengan O.

Bilangan oksidasi C yang paling umum dalam senyawa anorganik adalah +4, sedangkan +2 ditemukan dalam CO dan kompleks karbonil logam transisi. Sumber C-anorganik terbesar adalah batu gamping, dolomit, dan CO₂. Jumlah yang paling signifikan terdapat pada endapan organik batubara, gambut, minyak, dan klatrat metana. Karbon membentuk sejumlah besar senyawa, dengan hampir sepuluh juta senyawa yang ada, namun jumlah tersebut hanyalah sebagian kecil dari jumlah senyawa yang ada secara teoritis.

2.3 Siklus Karbon

Berbicara tentang siklus bahan organik tentu akan menggiring kita pada siklus C yang lebih besar. Dengan demikian, kita akan mengetahui posisi bahan organik tanah dalam skala global. Siklus C meliputi semua komponen ekosistem yang ada di alam ini.



Gambar 2. Siklus karbon yang memperlihatkan gerakan karbon di antara daratan, udara, dan lautan. Angka berwarna kuning mewakili proses alami, angka merah merupakan kontribusi manusia dalam $Gt\ thn^{-1}$. Sumber: Riebeek, 2011.

Karbon adalah tulang punggung kehidupan kita di alam ini. Kita sendiri terbuat dari C, kita juga memakan C dari makanan. Peradaban manusia, ekonomi kita, rumah kita, sarana transportasi, dan lain-lain, dibangun berdasarkan C. Singkatnya, kita membutuhkan C, tetapi kebutuhan itu juga terkait dengan salah satu masalah paling serius yang kita hadapi saat ini: perubahan iklim global.

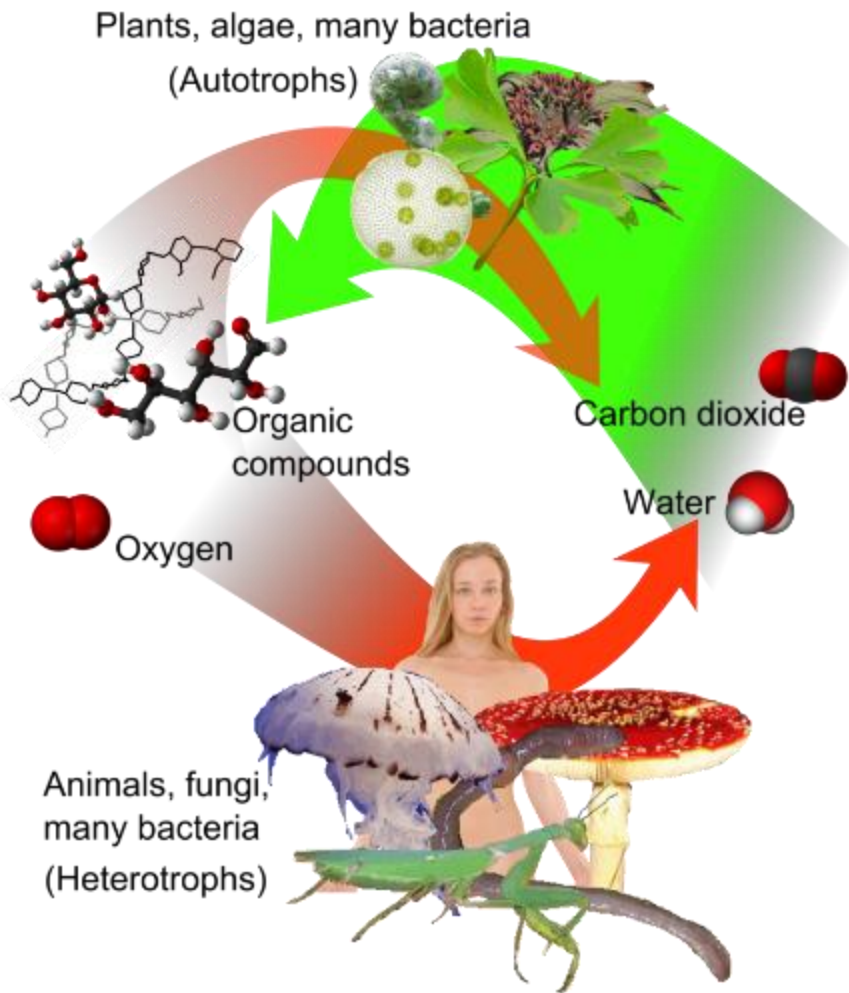
2.3.1 Siklus Cepat

Waktu yang dibutuhkan C untuk bergerak melalui siklus C cepat diukur dalam umur. Siklus C cepat sebagian besar adalah pergerakan C melalui bentuk kehidupan di bumi, atau biosfer. Antara 10¹⁵ dan 10¹⁷ g (1.000 hingga 100.000 juta metrik ton) C bergerak melalui siklus C cepat setiap tahun.

Karbon memainkan peran penting dalam sistem biologi karena kemampuannya untuk membentuk banyak ikatan (sampai empat ikatan per atom), terutama dalam molekul organik kompleks yang banyak terdapat di alam. Banyak molekul organik mengandung atom C yang telah membentuk ikatan kuat dengan atom C lainnya, bergabung menjadi rantai panjang dan cincin. Rantai dan cincin C semacam itu adalah dasar dari sel hidup. Misalnya, DNA (*deoxyribonucleic acid*), asam nukleat penyusun gen di dalam inti sel, terbuat dari dua molekul yang saling terkait yang dibangun di sekitar rantai C.

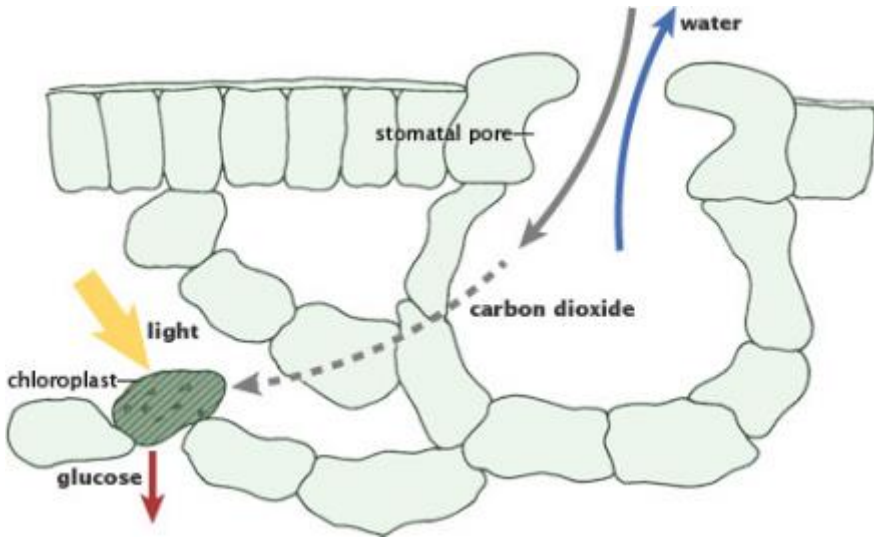
Ikatan dalam rantai C panjang mengandung banyak energi. Saat rantai putus, energi yang tersimpan dilepaskan. Energi ini membuat molekul C menjadi sumber bahan bakar yang sangat baik untuk semua makhluk hidup.

Siklus cepat C merujuk pada perputaran C di dalam ekosistem yang terjadi secara cepat melalui proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah. Bahan organik seperti daun, ranting, dan akar yang jatuh ke tanah didekomposisi oleh mikroba dan diubah menjadi bahan organik yang lebih sederhana, seperti CO₂, air, dan nutrisi lainnya. Proses ini dapat terjadi dalam hitungan bulan hingga beberapa tahun.



Gambar 3. Siklus emisi dan sekuestrasi C di alam. Hubungan antara siklus C dan formasi senyawa organik. Di dalam tanaman, CO_2 dan air diubah dan air menjadi senyawa organik sebagai sumber energi.

Dalam skala yang lebih kecil proses fotosintesis dapat dilihat pada gambar berikut ini.



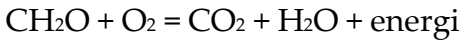
Gambar 4. Selama fotosintesis, tanaman menyerap CO₂ dan sinar matahari untuk menghasilkan glukosa dan gula lainnya untuk membangun struktur tanaman. Proses ini merupakan dasar dari siklus C cepat. Adaptasi dari Sellers et al., 1995.

Tumbuhan dan fitoplankton adalah komponen utama dari siklus C cepat. Fitoplankton (organisme mikroskopis di lautan) dan tanaman mengambil CO₂ dari atmosfer dengan menyerapnya ke dalam sel mereka. Menggunakan energi dari matahari, tanaman dan plankton menggabungkan CO₂ dan air untuk membentuk gula CH₂O dan O. Reaksi kimianya terlihat seperti ini:



Empat hal dapat terjadi untuk memindahkan C dari tumbuhan dan mengembalikannya ke atmosfer, tetapi semuanya melibatkan reaksi kimia yang sama. Tanaman memecah gula untuk mendapatkan energi yang mereka perlukan untuk tumbuh. Hewan (termasuk manusia) memakan tumbuhan atau plankton, dan memecah gula untuk mendapatkan energi. Tumbuhan dan plankton mati dan membusuk (dimakan oleh bakteri) pada akhir

musim tanam. Atau api memakan tumbuhan. Dalam setiap kasus, O₂ bergabung dengan gula untuk melepaskan air, CO₂, dan energi. Reaksi kimia dasar terlihat seperti ini:



Dalam keempat proses tersebut, CO₂ yang dilepaskan dalam reaksi biasanya berakhir di atmosfer. Siklus C cepat sangat erat kaitannya dengan kehidupan tumbuhan, sehingga musim tanam dapat dilihat dari cara CO₂ berfluktuasi di atmosfer. Pada musim dingin, di belahan bumi utara, ketika hanya sedikit tumbuhan darat yang tumbuh dan banyak yang membusuk, konsentrasi CO₂ di atmosfer meningkat. Selama musim semi, ketika tanaman mulai tumbuh kembali, konsentrasi menjadi turun.

2.3.2 Siklus Lambat

Melalui serangkaian reaksi kimia dan aktivitas tektonik, C membutuhkan waktu antara 100-200 juta tahun untuk bergerak di antara batuan, tanah, lautan, dan atmosfer dalam siklus lambat. Rata-rata, 10–100 juta metrik ton C bergerak melalui siklus lambat setiap tahunnya. Sebagai perbandingan, emisi C manusia ke atmosfer berada di urutan 10¹⁵ g, sedangkan siklus C cepat memindahkan 10¹⁶ menjadi 10¹⁷ g C per tahun.

Pergerakan C dari atmosfer ke litosfer (batuan) diawali dengan hujan. Karbon di atmosfer bergabung dengan air untuk membentuk H₂CO₃ yang jatuh ke permukaan tanah dalam bentuk hujan. Asam melarutkan batuan, proses hancuran iklim yang melepaskan ion Ca, Mg, K, atau Na. Sungai membawa ion-ion tersebut ke laut.

Di lautan, ion Ca bergabung dengan ion HCO₃ untuk membentuk CaCO₃, bahan aktif dalam obat maag dan kapur pertanian. Sebagian besar CaCO₃ dibuat oleh organisme bercangkang melewati proses kalsifikasi seperti karang dan plankton (*coccolithophores* dan foraminifera). Setelah organisme

mati, mereka tenggelam ke dasar laut. Seiring berjalannya waktu, cangkang dan sedimen berubah menjadi batu yang banyak mengandung C.

Kurang lebih 80% batuan yang mengandung C terbentuk melalui proses ini. Sisanya (20%), adalah C dari makhluk hidup (C-organik) yang terbenam dalam lumpur. Suhu dan tekanan di dalam lapisan bumi memampatkan lumpur dan C dalam waktu jutaan tahun, membentuk batuan sedimen. Dalam kasus tertentu, ketika biomassa tanaman mati menumpuk lebih cepat daripada yang dapat membusuk, lapisan C-organik menjadi minyak, batu bara, atau bahkan gas alam.

Siklus lambat mengembalikan C ke atmosfer melalui gunung berapi. Daratan dan lautan terletak pada lempeng kerak bumi yang bergerak. Saat lempeng bertabrakan, lempeng yang satu masuk ke bawah lempeng yang lain. Batu yang dibawanya meleleh menjadi magma karena panas dan tekanan yang ekstrem. Batuan yang dipanaskan bergabung kembali menjadi mineral silikat, melepaskan CO₂.

Ketika meletus, gunung berapi mengeluarkan gas ke atmosfer dan menutupi tanah dengan batu silikat segar untuk memulai siklus lagi. Saat ini, gunung berapi mengeluarkan antara 130 dan 380 juta metrik ton CO₂ per tahun. Sebagai perbandingan, manusia mengeluarkan sekitar 30 CO₂ miliar t thn⁻¹, 100-300 kali lebih banyak daripada gunung berapi dengan membakar bahan bakar fosil.

Kimia mengatur tarian ini antara lautan, daratan, dan atmosfer. Jika CO₂ naik di atmosfer karena peningkatan aktivitas gunung berapi, misalnya, suhu naik, menyebabkan lebih banyak hujan, yang melarutkan lebih banyak batuan, menghasilkan lebih banyak ion yang pada akhirnya akan menyimpan lebih banyak C di dasar laut. Dibutuhkan beberapa ratus ribu tahun untuk menyeimbangkan kembali siklus C lambat melalui pelapukan kimia.

Namun, siklus C lambat juga mengandung komponen yang sedikit lebih cepat, yaitu lautan. Di permukaan laut, di mana

udara bertemu air, gas CO₂ larut dan keluar dari laut dalam sistem pertukaran yang stabil. Begitu berada di dalam lautan, gas CO₂ bereaksi dengan molekul air untuk melepaskan H, sehingga lautan menjadi lebih masam. Hidrogen bereaksi dengan CO₃ dari pelapukan batuan untuk menghasilkan ion HCO₃.

Sebelum zaman industri, lautan melepaskan CO₂ ke atmosfer seimbang dengan C yang diterima lautan dalam pelapukan batuan. Namun, karena konsentrasi C di atmosfer jauh meningkat, lautan kini mengambil lebih banyak C dari atmosfer daripada yang dilepaskannya. Selama ribuan tahun, lautan menyerap hingga 85% C ekstra yang telah dibuang manusia ke atmosfer karena bahan bakar fosil. Prosesnya agak lambat karena terkait dengan pergerakan air dari permukaan ke dasar laut. Sementara itu, angin, arus, dan suhu mengontrol kecepatan lautan mengambil CO₂ dari atmosfer. Perubahan suhu dan arus lautan membantu menghilangkan C dari dan ke atmosfer sejak zaman es berakhir.

Siklus lambat C, di mana C disimpan dalam bahan organik tanah yang lebih kompleks dan berumur lebih lama, seperti humus. Humus adalah bahan organik stabil yang terbentuk melalui dekomposisi bahan organik yang lebih sederhana dan dapat bertahan selama puluhan hingga ribuan tahun.

Kedua siklus C ini memainkan peran penting dalam siklus C global dan perubahan iklim. Siklus cepat C merupakan sumber utama CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer, sedangkan siklus lambat menyimpan C di tanah dan mencegahnya terlepas ke atmosfer. Karena itu, menjaga kesehatan tanah dengan meningkatkan kadar bahan organik dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengurangi dampak perubahan iklim.

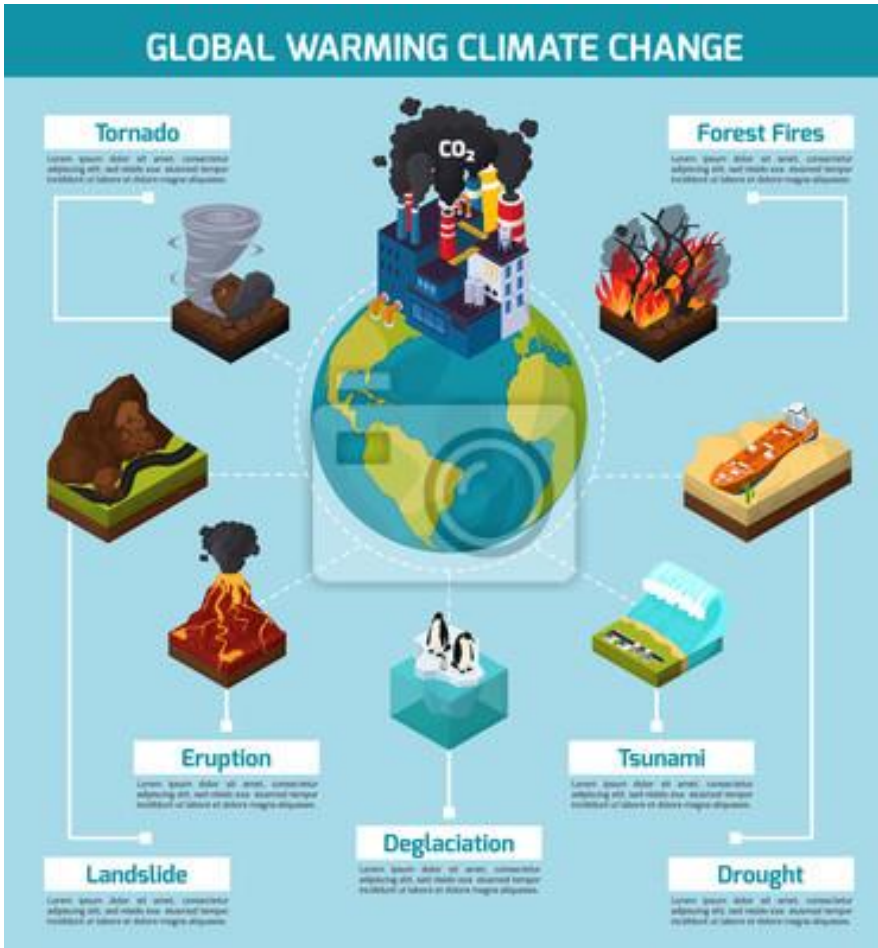
2.4 Pemanasan Global

Pertanyaan sederhana akan muncul bisa kita mendengar pemanasan global (*global warming*). Pemanasan global adalah suatu bentuk ketidakseimbangan ekosistem di bumi akibat

terjadinya proses peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan. Hal ini disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca, terutama CO₂ yang menahan panas di atmosfer. Akibatnya, suhu bumi meningkat, berdampak pada perubahan iklim, naiknya permukaan air laut, dan gangguan ekologis. Pemanasan global terjadi karena aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi. Sementara itu, mekanisme sekuestrasi C hanya bergantung pada fotosintesis yang semakin sedikit kemampuannya dalam skala global.

Dampak pemanasan global terhadap lingkungan hidup sangat signifikan dan semakin sering terjadi akhir-akhir ini. Berikut adalah beberapa dampaknya:

- Punahnya spesies tertentu yang sebelumnya sudah terancam. Perubahan ekstrem pada habitat tertentu mengancam tidak hanya fauna, tetapi juga flora. Kekurangan pangan dan perubahan cuaca memengaruhi kelangsungan hidup mereka. Semua spesies lemur yang unik di Madagaskar menghadapi risiko kepunahan karena perubahan iklim. Habitat mereka terancam oleh perubahan suhu dan perubahan ekosistem. Demikian pula macan tutul salju, hewan paling karismatik di kawasan Himalaya, juga terancam punah akibat perubahan iklim. Pencairan es di habitatnya mengancam kelangsungan hidupnya. Tanaman medis seperti lumut (*Lobaria pindarensis*), yang digunakan untuk meredakan radang sendi, juga terancam punah. Perubahan iklim di wilayah Himalaya ini juga memengaruhi distribusi dan ketersediaan tanaman ini. Dampak perubahan iklim pada spesies-spesies ini menunjukkan urgensi perlindungan lingkungan dan upaya mitigasi. Yang paling berpengaruh kepada kita adalah kepunahan spesies akan berdampak pada ekosistem dan rantai makanan, termasuk manusia.



Gambar 5. Beberapa perubahan alam yang berasal dari pemanasan global yang sudah terjadi. Sumber: myloviev, 2024.

- *Coral bleaching*. Pemanasan global menyebabkan *bleaching* karang. Karang kehilangan warna karena stres suhu tinggi, mengancam ekosistem terumbu karang. *Coral bleaching* adalah proses di mana karang kehilangan warnanya dan berubah menjadi putih karena berbagai faktor stres, seperti perubahan suhu, cahaya, atau nutrisi. Ketika karang mengalami stres, polip karang mengeluarkan alga simbiotik yang hidup di dalam jaringan mereka,

menyebabkan karang berubah warna menjadi putih. Meskipun karang yang mengalami *bleaching*, tidak mati, mereka mengalami stres lebih tinggi dan berisiko mengalami kematian. Pemanasan air laut yang berlebihan adalah penyebabnya. Ketika suhu air terlalu tinggi, karang akan mengeluarkan alga (*zooxanthellae*) yang hidup di dalam jaringan mereka, menyebabkan perubahan warna menjadi putih. Meskipun karang yang mengalami *bleaching* belum mati, mereka berada dalam kondisi yang lebih rentan dan berisiko mengalami kematian. Pada tahun 2005, Amerika Serikat kehilangan setengah dari terumbu karangnya di Karibia dalam satu tahun akibat peristiwa *bleaching* yang masif. Perairan hangat di sekitar Antilles Utara dekat Kepulauan Virgin dan Puerto Rico mengalami ekspansi ke selatan. Perbandingan data satelit selama 20 tahun sebelumnya mengonfirmasi bahwa stres akibat perubahan suhu laut dari tahun 2005 lebih besar daripada 20 tahun sebelumnya secara keseluruhan. Tidak semua peristiwa *bleaching* disebabkan oleh air hangat. Pada Januari 2010, suhu air yang dingin di Florida Keys menyebabkan peristiwa *bleaching* pada karang yang mengakibatkan beberapa kematian karang. Suhu air turun hingga $-6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ lebih rendah dari suhu tipikal yang diamati pada waktu ini. Para peneliti akan mengevaluasi apakah peristiwa stres akibat suhu dingin ini akan membuat karang lebih rentan terhadap penyakit seperti halnya suhu air yang lebih tinggi memengaruhi karang



Gambar 6. Proses *coral bleaching* yang mengancam kehidupan biota laut secara keseluruhan. Sumber: National Ocean Services. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024.

- Kebakaran hutan. Suhu yang lebih tinggi meningkatkan risiko kebakaran hutan. Kebakaran merusak hutan dan mengeluarkan gas rumah kaca.
- Kabut asap. Kebakaran hutan menghasilkan asap yang mencemari udara dan mengganggu kesehatan manusia serta hewan. Masih ingat gelar yang diberikan negara luar kepada Indonesia?
- Perubahan iklim ekstrem. Cuaca yang tidak menentu, banjir, dan badai besar semakin sering terjadi akibat pemanasan global.
- Pencairan es di kutub. Keadaan ini memicu terjadinya butir sebelumnya tentang musnahnya spesies tertentu.

Pencairan es di kutub mengancam keberlanjutan iklim dan menyebabkan kenaikan permukaan air laut.

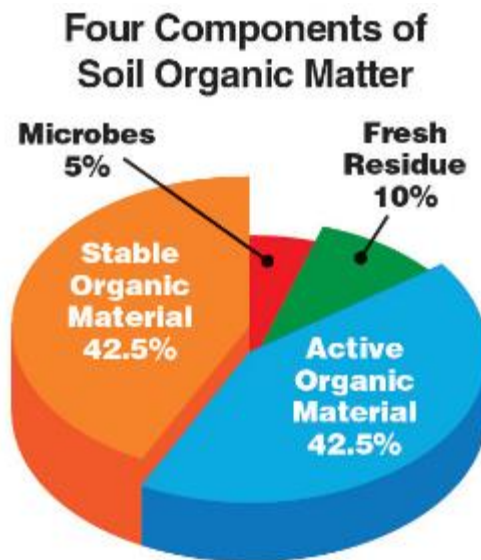
- Gangguan ekosistem. Pemanasan global mengubah ekosistem, mengancam keberagaman hayati dan layanan ekosistem.

Dengan memahami dampak ini, kita perlu mengambil tindakan untuk mengurangi pemanasan global dan melindungi lingkungan hidup, walaupun hanya dalam skala kecil (individu).

3 KLASIFIKASI BAHAN ORGANIK TANAH

Berdasarkan penelitian yang ada, bahan organik tanah dapat diklasifikasikan menjadi tiga fraksi utama:

- Fraksi aktif. Fraksi ini terdiri dari sisa-sisa tanaman, binatang, dan mikroba yang sedang melapuk. Fraksi ini cepat bereaksi dan berubah dalam tanah.
- Fraksi hidup. Komponen fraksi ini meliputi biota tanah hidup atau biomassa yang tersusun atas mikroorganisme, binatang, dan perakaran tanaman.
- Fraksi pasif. Fraksi ini dikenal juga sebagai *recalcitrant*, fraksi ini terdiri dari bahan organik yang resistan terhadap degradasi biologis karena sifat fisik dan kimianya.



Gambar 7. Komponen bahan organik berdasarkan aktif dan pasifnya senyawa pembentuk.

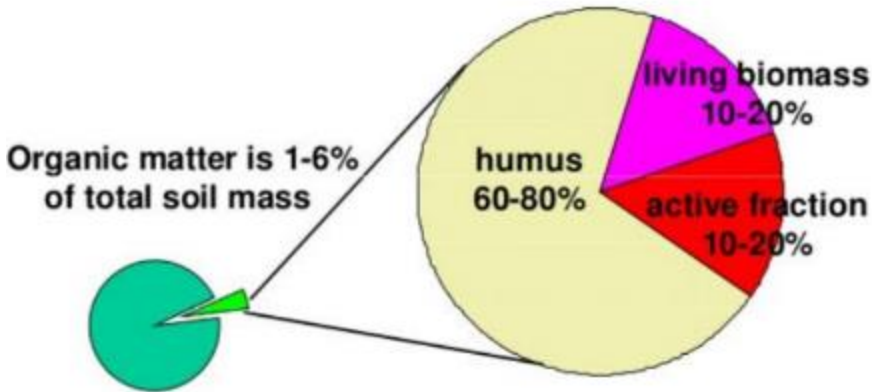
3.1 Bahan organik aktif

Klasifikasi bahan organik aktif dalam tanah sangat penting karena fraksi ini cepat bereaksi dan berubah, memiliki dampak langsung pada kesuburan tanah dan ketersediaan nutrisi. Bahan organik aktif terdiri dari:

- Sisa-sisa tanaman dan limbah domestik. Komponen ini adalah bahan organik segar yang baru ditambahkan ke dalam tanah dan masih memiliki kandungan gula yang tinggi serta energi yang besar.
- Bahan organik yang terdekomposisi sebagian. Komponen ini adalah bahan yang telah mengalami dekomposisi seiring waktu dan terus terpapar unsur lingkungan di sekitarnya. Meskipun tidak sebanyak bahan organik segar, fraksi ini masih memiliki kandungan nutrisi yang penting bagi tanah.
- Bahan organik yang sudah terurai. Komponen ini telah terurai dalam waktu yang lama dan tidak memiliki banyak nutrisi tetapi membantu mendukung penyerapan air di dalam tanah.

Kualitas bahan organik aktif tidak hanya ditentukan oleh kandungan hara, tetapi juga kecepatan pelapukannya yang dilihat dari kandungan lignin, nisbah C/N, C/P, dan C/S. Pengelolaan bahan organik aktif yang tepat dapat meningkatkan kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman yang sehat.

Soil Organic Matter



Soil organic matter encompasses all organic components of the soil:

- Living organisms
- Fresh residues
- Decomposing OM
- Stable OM

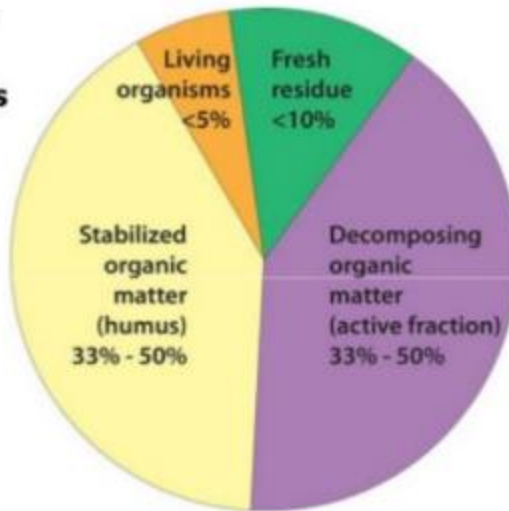
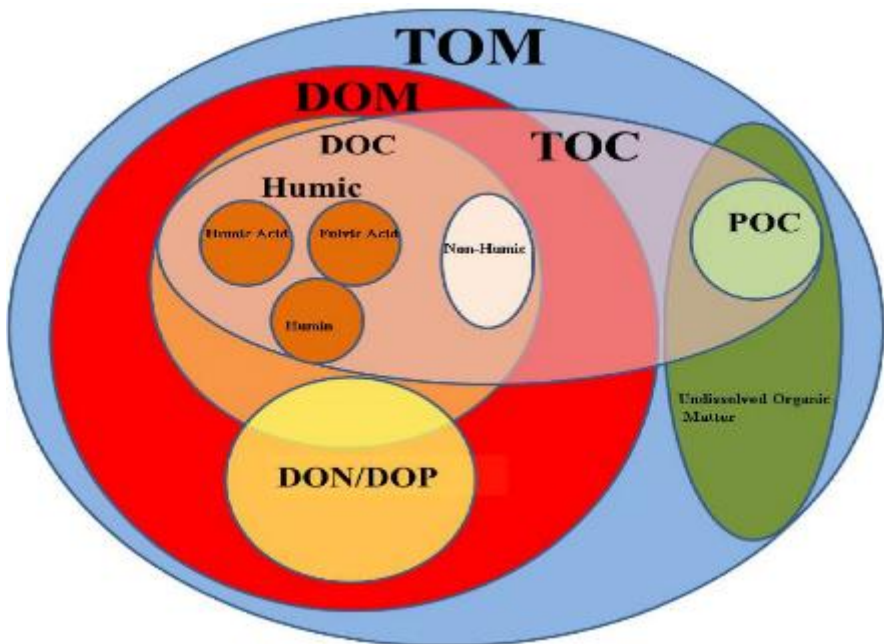


Image: soils.usda.gov

Gambar 8. Klasifikasi sederhana bahan organik tanah menurut *United States of America Department of Agriculture*.

Gambar di atas memperlihatkan fraksi yang agak berbeda pada bagian persentase fraksi aktif. *Pie chart* pertama dengan persentase antara 10-20%, sementara *pie chart* di bawahnya dengan persentase 33-50%. Walaupun demikian, persentase *living biomass* pada *pie chart* pertama kurang lebih sama dengan *living organism* +

fresh residue (10-20% dengan 15%). Perbedaan persentase pada fraksi aktif diduga karena perbedaan jenis tanah yang mengakibatkan perbedaan kandungan bahan organik tanah secara keseluruhan.



Gambar 9. Pembagian bahan organik tanah berdasarkan kelarutan dan unsur yang menyertainya.

Berdasarkan penelitian, bahan organik inilah yang paling berperan dalam siklus unsur hara maupun unsur lain yang ada di alam ini. Namun, karena bahan ini sangat mudah terurai, maka kita harus bisa mempertahankan atau bahkan menambah jumlahnya ke dalam tanah. Oleh karena itu, kita mengenal apa yang disebut sebagai konservasi bahan organik tanah. Tidak kalah penting juga adalah mempertahankan *C stock* yang seharusnya tetap jumlahnya di dalam tanah. Dengan kata lain, total-C (warna biru pada Gambar 8) harus tetap ada di dalam

tanah seperti sebelumnya. Boleh jadi sebelum adanya keterlibatan manusia (antropogenik) di alam ini.

3.2 Bahan organik resistan

Fraksi bahan organik ini termasuk gambut yang digambarkan sebagai fraksi yang sudah tahan terhadap perombakan oleh mikroorganisme. Walaupun demikian, bukan berarti gambut menjadi fraksi non-aktif dari bahan organik tanah. Dengan pengolahan lebih lanjut, gambut bisa menjadi fraksi aktif lagi untuk menjadi bahan organik yang bermanfaat.

Gambut bisa juga didefinisikan sebagai jenis tanah yang terbentuk dari akumulasi sisa-sisa tumbuhan yang setengah membusuk dalam kondisi asam dan anaerobik di lahan basah. Tanah gambut kaya akan bahan organik dan memiliki karakteristik fisik dan teknis yang unik, seperti kandungan air yang tinggi, porositas besar, dan adanya serat-serat organik. Di Indonesia, lahan gambut tersebar luas di pulau Sumatera, Kalimantan, Papua, dan sebagian kecil di Sulawesi, dengan total luas diperkirakan mencapai 22,5 juta ha.

Gambut memiliki berbagai manfaat yang penting, baik untuk lingkungan maupun kegiatan manusia. Berikut adalah beberapa manfaat utama dari lahan gambut:

- Penyimpan C. Gambut mampu menyerap dan menyimpan CO₂ dalam jumlah besar, yang membantu mengurangi efek gas rumah kaca.
- Regulasi hidrologi. Gambut dapat menampung air saat musim hujan dan melepaskannya secara perlahan selama musim kemarau, membantu mencegah banjir dan kekeringan.
- Habitat keanekaragaman hayati. Gambut menjadi rumah bagi berbagai spesies tumbuhan dan hewan, termasuk beberapa yang dilindungi

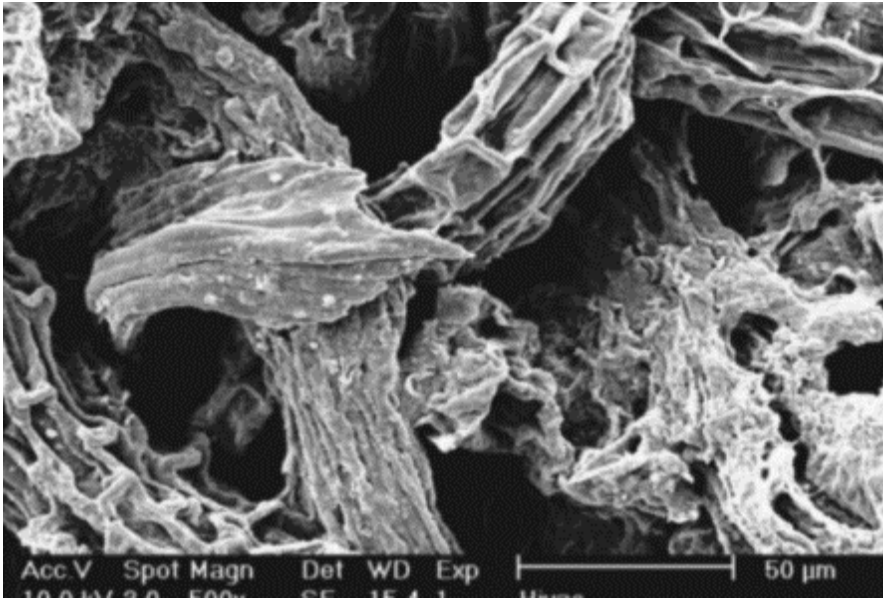
- Sumber energi. Gambut dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik atau panas. Di negara-negara Eropa Timur gambut ditambang seperti batubara dan dimanfaatkan sebagai bahan bakar.
- Media tanam. Tanah gambut sering digunakan sebagai media tanam untuk berbagai jenis tanaman, terutama pada saat pembibitan. Dengan campuran tambahan berupa tanah mineral dengan komposisi yang ideal gambut merupakan bahan organik asalkan sudah mengalami dekomposisi aerobik setelah diambil dari tempat aslinya. Gambut juga bermanfaat di negara-negara bergurun. Dengan tambahan komponen liat dan debu serta *drip irrigation* melingkar, negara-negara Saudi Arabia, Qatar, dan Uni Emirat Arab memanfaatkan gambut untuk usaha pertanian mereka.



Gambar 10. Gurun pasir yang bisa menjadi media tanam yang subur asal memenuhi komponen tanah ideal. Gambut dan air menjadi dua *input* paling penting.

- Bahan baku industri. Gambut dapat diolah menjadi produk seperti kertas dan papan fiber untuk penggunaan lain. Eksploitasi seperti ini belum ada di Indonesia.
- Sumber mata pencaharian. Masyarakat di sekitar lahan gambut sering bergantung pada sumber daya ini untuk pertanian dan perikanan.

Pengelolaan lahan gambut yang berkelanjutan sangat penting untuk memastikan bahwa manfaat ini dapat terus dinikmati tanpa merusak ekosistem yang unik dan penting ini.



Gambar 11. Gambut, salah satu fraksi stabil bahan organik tanah, di bawah mikroskop elektron. Tampak jelas struktur sel dari bahan tumbuhan asal.

Bahan organik tanah dapat diklasifikasikan menjadi beberapa fraksi berdasarkan asal usulnya, tahap dekomposisi, dan komposisi kimianya. Berikut gambaran singkat klasifikasinya:

- Residu organik segar. Bagian ini adalah sisa tanaman dan hewan yang relatif baru, seperti daun, sisa tanaman, dan pupuk kandang, yang belum mengalami pembusukan secara signifikan.
- Bahan organik partikulat (POM). Bagian ini terdiri dari partikel organik yang lebih besar ($>53 \mu\text{m}$) yang secara fisik terlindungi di dalam agregat. Agregat ini memberikan perlindungan terhadap dekomposisi, yang menyebabkan tingkat pergantian lebih lambat dibandingkan dengan fraksi bahan organik lainnya.
- Humus. Humus adalah fraksi bahan organik tanah yang relatif stabil yang dihasilkan dari penguraian residu organik. Ini terdiri dari senyawa organik kompleks yang terbentuk melalui aktivitas mikroba dan proses kimia. Humus berkontribusi terhadap struktur tanah, retensi nutrisi, dan kapasitas menahan air.

- Biomassa mikroba. Fraksi ini mencakup mikroorganisme hidup (bakteri, jamur, alga, protozoa, dan yang lainnya) dan biomassa mati di dalam tanah. Biomassa mikroba memainkan peran penting dalam siklus nutrisi dan dekomposisi bahan organik.
- Bahan organik stabil. Bahan organik ini terdiri dari senyawa organik yang dilindungi secara kimia di dalam agregat tanah atau permukaan mineral. Senyawa ini kurang rentan terhadap penguraian mikroba dan dapat bertahan di dalam tanah untuk jangka waktu lama.
- Fraksi non-humat. Fraksi non-humat mencakup molekul organik sederhana seperti gula, asam amino, dan asam organik. Senyawa ini relatif labil dan dapat mengalami dekomposisi mikroba dengan cepat.
- Arang dan karbon hitam. Arang dan C hitam adalah bahan kaya C yang dihasilkan dari pembakaran bahan organik yang tidak sempurna. Bahan ini dapat bertahan di dalam tanah selama ribuan tahun dan berkontribusi terhadap kesuburan tanah dan penyerapan C.

Memahami komposisi dan dinamika fraksi bahan organik ini penting untuk menilai kesehatan tanah, kesuburan, dan ketahanan terhadap perubahan lingkungan.

Klasifikasi fraksi bahan organik tanah didasarkan pada penelitian dan pemahaman ilmiah yang dikembangkan oleh para ilmuwan tanah, ahli ekologi, dan ahli agronomi selama beberapa dekade. Klasifikasi ini umumnya digunakan dalam literatur ilmu tanah, penelitian pertanian, dan studi lingkungan untuk mendeskripsikan dan mengukur berbagai komponen bahan organik dalam tanah. Berbagai metode, termasuk fraksinasi fisik, analisis kimia, dan teknik mikroba, digunakan untuk karakterisasi dan mengukur fraksi bahan organik dalam sampel tanah. Meskipun mungkin ada sedikit variasi dalam terminologi dan sistem klasifikasi di antara para peneliti dan institusi, kerangka umum yang diuraikan sebelumnya diterima secara luas dalam komunitas ilmiah.

4 HILANGNYA BAHAN ORGANIK TANAH

Hilangnya bahan organik tanah di lahan pertanian biasanya karena erosi dan mineralisasi atau dekomposisi. Keduanya sering dianggap sebagai faktor paling serius yang menyebabkan degradasi tanah. Kehilangan ini jelas merugikan tanah, baik dari sifat fisik, kimia, dan biologi. Mempertahankan dan meningkatkan kandungan bahan organik tanah adalah tujuan penting dari setiap sistem pertanian berkelanjutan.

Di sebagian besar negara berkembang, perluasan lahan pertanian merupakan masalah besar karena daerah pertanian berada di bawah tekanan laju pertumbuhan penduduk yang tinggi dan perluasan wilayah perkotaan menjadi tanah pertanian yang produktif. Akibatnya, tanah dengan kesuburan rendah cenderung menjadi alternatif yang paling mungkin untuk memperluas pembangunan pertanian. Namun, di banyak negara berkembang, pengetahuan yang dibutuhkan untuk memanfaatkan tanah-tanah ini Masih kurang jika dibandingkan dengan pengetahuan tentang tanah pertanian yang ada.

Secara lebih rinci, kehilangan bahan organik tanah mengacu pada penurunan kuantitas dan kualitas bahan organik dalam tanah seiring berjalannya waktu. Beberapa faktor berkontribusi terhadap hilangnya bahan organik tanah, termasuk:

- Erosi. Erosi tanah, baik oleh angin maupun air, dapat menyebabkan hilangnya lapisan tanah lapisan atas yang kaya akan bahan organik. Kehilangan ini dapat terjadi baik melalui pelepasan fisik partikel tanah maupun pengangkutan senyawa organik terlarut.
- Pengolahan tanah. Praktik pengolahan tanah yang intensif dapat mempercepat penguraian bahan organik dengan memaparkannya pada aktivitas mikroba dan oksidasi. Hal ini mengakibatkan peningkatan mineralisasi dan hilangnya C-organik dari tanah.

- Deforestasi dan konversi lahan. Pembukaan hutan atau konversi ekosistem alami menjadi lahan pertanian atau perkotaan dapat mengakibatkan hilangnya bahan organik tanah dengan cepat. Hal ini dikarenakan terganggunya tutupan vegetasi dan gangguan tanah dapat meningkatkan laju dekomposisi dan menurunkan masukan bahan organik.
- Perubahan iklim. Perubahan suhu dan pola curah hujan yang terkait dengan perubahan iklim dapat mempengaruhi dinamika bahan organik tanah. Suhu yang lebih hangat dapat mempercepat aktivitas mikroba dan laju dekomposisi, sementara perubahan pola curah hujan dapat mempengaruhi masukan bahan organik dan tingkat kelembapan tanah.
- Polusi. Polusi dari aktivitas industri, limpasan pertanian, dan pembuangan limbah yang tidak tepat dapat memasukkan kontaminan ke dalam tanah yang menghambat aktivitas mikroba dan mendegradasi bahan organik.
- Penggembalaan berlebihan. Penggembalaan berlebihan yang dilakukan oleh peternak dapat menyebabkan hilangnya tutupan vegetasi dan pemadatan tanah, yang dapat menurunkan masukan bahan organik dan meningkatkan laju erosi, sehingga mengakibatkan hilangnya bahan organik tanah.
- Deposisi N. Deposisi N tingkat tinggi dari pupuk pertanian, emisi industri, dan polusi atmosfer dapat mengubah komunitas mikroba tanah dan meningkatkan laju dekomposisi bahan organik, sehingga menyebabkan hilangnya bahan organik tanah.

Hilangnya SOM dapat berdampak signifikan terhadap kesuburan tanah, struktur, dan fungsi ekosistem. Hal ini dapat mengurangi kapasitas tanah menahan air, retensi unsur hara, dan

ketahanan terhadap tekanan lingkungan seperti kekeringan dan erosi. Oleh karena itu, praktik pengelolaan lahan berkelanjutan yang bertujuan untuk mengurangi erosi, meminimalkan gangguan tanah, meningkatkan masukan bahan organik, dan mitigasi perubahan iklim sangat penting untuk melestarikan dan meningkatkan kandungan bahan organik tanah.

4.1 Lahan laterit dan sub-optimal

Tanah laterit seperti Ultisols dan Oxisols, yang umumnya rendah bahan organik tanah, bersifat asam, memiliki kapasitas tukar kation yang terbatas, dan memiliki status hara rendah dapat menjadi lebih cocok untuk tanaman pangan jika kadar bahan organik tanah dinaikkan. Hal ini dapat dicapai dengan mengubah tanah dengan berbagai sumber bahan organik. Secara lebih khusus, transformasi C-organik tanah selama dekomposisi bahan organik memungkinkan tanah menyediakan nutrisi bagi tanaman, terutama P. Dalam hal ini, C-organik tanah telah diketahui memengaruhi adsorpsi P dan berkorelasi positif dengan aktivitas fosfatase, enzim yang berperan dalam kelarutan P.

Gambut sebagai sumber bahan organik dapat dimanfaatkan menjadi pembenah organik untuk mengelola tanah laterit yang tidak subur. Pemanfaatan gambut secara luas, yaitu sebagai media pertumbuhan di pembibitan kehutanan dan sebagai pembenah tanah, juga dapat mengatasi keterbatasan kandungan bahan organik tanah di lahan laterit, terutama di negara tropis seperti Indonesia. Endapan gambut melimpah di Sumatera, Kalimantan, dan Papua Indonesia. Di samping itu, tanah laterit yang luas bisa menjadi alternatif produksi pertanian dan mengamankan pasokan pangan di wilayah tersebut.

4.2 Strategi pengelolaan

Untuk meningkatkan kesuburan tanah laterit atau tanah dengan perkembangan lanjut ada beberapa strategi yang bisa dilakukan, antara lain:

- Pemberian amendemen tanah dan bahan organik. Strategi ini dilakukan dengan penambahan bahan organik atau kompos yang sudah terurai sempurna, pupuk kandang, atau tanaman penutup (*cover crop*). Semua jenis bahan organik di atas, secara fisik, memperbaiki struktur tanah, ketersediaan nutrisi, dan retensi air. Contoh tanaman penutup yang cukup dikenal adalah *Desmodium* spp. Tanaman ini ditanam untuk melindungi tanah dari erosi dan memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah. Akar *Desmodium* spp. dapat bersimbiosis dengan bakteri *Rhizobium* dan membentuk bintil akar, yang berperan dalam pengikatan N dari udara. Kebanyakan *Legume Cover Crop* (LCC) memiliki kelebihan tersendiri karena simbiosis tersebut.
- Pemanfaatan mulsa. Mulsa yang banyak dikenal adalah yang bersifat organik (misalnya jerami, daun kering, dan cacahan kayu). Mulsa membantu menjaga kelembaban, mengatur suhu, dan memberikan nutrisi saat terurai. Mulsa yang bersifat organik digunakan untuk menutup bedengan dan memiliki beberapa jenis, seperti alang-alang, arang sekam, serbuk gergaji, daun bambu, dan kelobot dan batang jagung. Mulsa organik menghemat biaya produksi karena harganya relatif murah. Selain itu, mulsa organik juga mudah diperoleh dan dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah bila sudah terurai sempurna.
- Manajemen unsur hara. Strategi ini memerlukan pengetahuan yang lebih jauh tentang reaksi kimia unsur hara di dalam tanah. P dan K dapat diberikan dalam bentuk pupuk majemuk yang ada di pasaran. Tetapi harus bisa

dipastikan kalau dosis pemberian harus sesuai dengan kebutuhan tanaman dan kemampuan tanah menyediakan secara alami. Berikan pupuk seimbang yang mengandung keduanya. Kedua unsur hara ini sangat penting untuk pertumbuhan generatif tanaman.



Gambar 12. Pemanfaatan jerami sebagai mulsa untuk tanaman porang.

- Pemberian hara mikro. Atasi kekurangan unsur hara mikro dengan pemberian pupuk yang sesuai (misalnya Zn, Fe, dan Mn). Perlu diingat, tanah dengan perkembangan lanjut biasanya banyak mengandung unsur Fe dan Mn. Ada kemungkinan pada tanah tersebut tidak pernah ada riwayat kekurangan hara mikro.
- Pemberian kapur. Tanah laterit sering bersifat asam. Pemberian kapur meningkatkan pH tanah, memperbaiki ketersediaan nutrisi, dan meningkatkan aktivitas mikroba.
- Melakukan rotasi tanaman dan penutup tanah pada saat tidak ditanami. Pergantian tanaman pada setiap musim tanam bermanfaat untuk memutus siklus hama dan

penyakit serta menjaga kesehatan tanah. Pada saat yang sama dapat menambah unsur hara karena tanaman penutup tanah yang bisa menambat N dan kesempatan dekomposisi bahan organik baru.

- Tanaman penutup pohon. Tanaman penutup berakar tunggang (misalnya sengon, turi, dan trembesi) untuk memperbaiki struktur tanah dan memperkaya nutrisi. Telah diketahui pula kemampuan yang tinggi dari trembesi yang bisa menyerap C.
- Pengendalian erosi tanah. Praktik terbaik untuk mencegah terjadinya erosi tanah pada lahan miring adalah pembuatan terasering. Selanjutnya adalah penanaman berdasarkan garis kontur (*contour planting*). Aliran permukaan dan erosi dipastikan sangat minimal.
- Manajemen air. Penekanan strategi ini lebih pada adanya irigasi dan pembuatan embung untuk musim kering. Sifat tanah yang cepat kering karena permeabilitas yang tinggi akibat perkembangan lanjut dapat diatasi dengan strategi ini. Gerakan pembuatan embung merupakan bentuk konservasi air yang lazim dilakukan pada daerah yang sering dilanda kekeringan. Pemeliharaan situ (kolam alami) yang sering terdapat di pelosok desa juga merupakan alternatif.

Praktik konservasi tanah. Strategi ini akan berhasil baik apabila mencakup semua sifat dasar tanah ideal untuk perkembangan tumbuhan.



Gambar 13. Strategi konservasi yang mencakup hampir semua aspek sifat dasar tanah (fisik, kimia, dan biologi) yang bisa ditemukan hampir di semua pelosok yang cocok untuk padi.

- Pertanian tanpa olah tanah. Strategi yang lebih dikenal sebagai *zero tillage* ini tidak sepenuhnya bisa digunakan, apalagi padi saat awal pengembangan wilayah. Prinsip yang dipegang adalah mengurangi gangguan tanah untuk mempertahankan bahan organik dan mencegah erosi.
- Agroforestri. Strategi baru apabila harus memanfaatkan hutan alami untuk menyokong kebutuhan komunitas manusia yang terus bertambah. Gabungkan pohon dan tanaman untuk memperbaiki struktur tanah dan siklus nutrisi.
- *Biofertilizer* dan inokulan mikroba. Strategi ini bersifat biokimia yang memanfaatkan mikroba tanah (inheren

maupun introduksi) untuk meningkatkan penyerapan nutrisi dengan membentuk hubungan simbiotik antara mikroba dengan akar tanaman.

- Uji tanah dan pemantauannya. Strategi ini kedengaran agak modern karena memanfaatkan analisis laboratorium. Bentuk yang lebih sederhana adalah menggunakan *soil test kit* yang lebih terjangkau. Usaha ini menyatu dengan pemantauan berkala yang pada akhirnya akan memutuskan kapan dan apa yang akan kita beri kepada tanah. Pilihan konservasi atau pemupukan adalah dua hal yang berbeda. Yang pertama hanya input tenaga, sementara yang kedua ditambah dengan material.
- Pendidikan dan pengabdian masyarakat. Tidak kalah penting adalah usaha pemerintah untuk melakukan penyuluhan dan pengabdian kepada masyarakat. Pendidikan dan percontohan tentang praktik pertanian berkelanjutan dan teknik konservasi tanah merupakan topik yang tidak pernah basi.

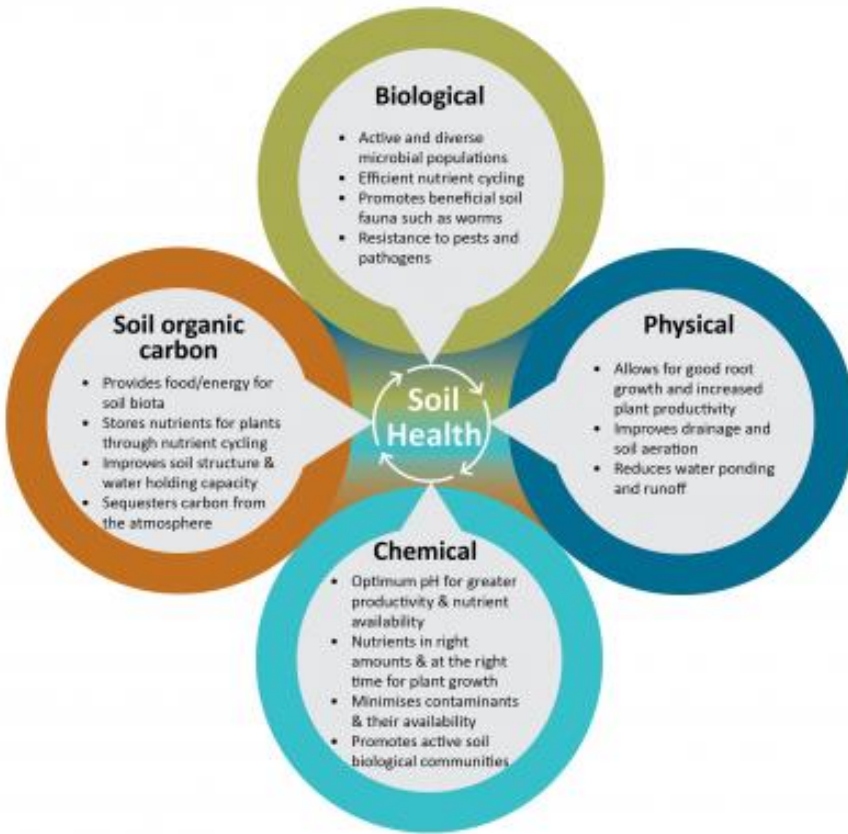
Ingatlah bahwa perbaikan kesuburan tanah laterit adalah proses bertahap. Menggabungkan beberapa strategi di atas akan menghasilkan hasil panen yang lebih baik dan tanah yang lebih sehat seiring berjalannya waktu.

5 MANFAAT BAHAN ORGANIK TANAH

Hilangnya bahan organik tanah di lahan pertanian, biasanya karena erosi dan/atau mineralisasi yang cepat, sering dianggap sebagai faktor paling serius yang menyebabkan degradasi tanah. Kehilangan ini dapat memiliki efek merugikan pada sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Memang, mempertahankan dan meningkatkan kandungan bahan organik tanah secara umum diterima sebagai tujuan penting dari setiap sistem pertanian berkelanjutan.

Di sebagian besar negara berkembang, perluasan lahan pertanian merupakan masalah besar karena daerah pertanian berada di bawah tekanan laju pertumbuhan penduduk yang tinggi dan perluasan wilayah perkotaan menjadi tanah pertanian yang produktif. Akibatnya, tanah dengan kesuburan rendah cenderung menjadi alternatif yang paling mungkin untuk memperluas pembangunan pertanian. Namun, di banyak negara berkembang, pengetahuan yang dibutuhkan untuk mengeksploitasi tanah ini jauh di belakang pengetahuan tentang tanah pertanian yang ada.

Tanah laterit seperti Ultisols dan Oxisols, yang umumnya rendah bahan organik tanah, bersifat asam, memiliki kapasitas tukar kation yang terbatas, dan memiliki status hara rendah dapat menjadi lebih cocok untuk tanaman pangan jika kadar bahan organik tanah dinaikkan. Hal ini dapat dicapai dengan mengubah tanah dengan berbagai sumber bahan organik. Secara lebih khusus, transformasi C-organik tanah selama dekomposisi bahan organik memungkinkan tanah menyediakan nutrisi bagi tanaman, terutama P. Dalam hal ini, C-organik tanah telah diketahui mempengaruhi adsorpsi P.



Gambar 14. Pengaruh bahan organik terhadap sifat fisik, kimia, dan biologi tanah merupakan kunci tercapainya kesuburan dan kesehatan tanah.

Gambut sebagai sumber bahan organik dapat berguna sebagai pembenah organik dalam mengelola tanah laterit yang tidak subur. Pemanfaatan gambut secara luas, yaitu sebagai media pertumbuhan di pembibitan kehutanan dan sebagai pembenah tanah, juga dapat mengatasi keterbatasan kandungan bahan organik tanah di lahan laterit, terutama di negara tropis seperti Indonesia. Ada juga area tanah laterit yang luas namun terabaikan yang mungkin menjadi alternatif produksi pertanian selanjutnya untuk mengamankan pasokan pangan di area ini.

5.1 Amendemen Organik

Amandemen organik dalam lingkup ilmu tanah merujuk pada perubahan atau penambahan bahan-bahan alami atau organik ke dalam tanah dengan tujuan memperbaiki sifat-sifat tanah dan meningkatkan kesuburan. Berikut beberapa contoh amandemen organik yang sering digunakan:

- Pupuk kandang, sering juga disebut sebagai pukan. Pupuk kandang yang umum dikenal adalah kotoran sapi, ayam, atau kambing, mengandung bahan organik yang dapat meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah. Pupuk kandang juga mengandung nutrisi penting seperti N, P, dan K. Pupuk kandang juga dipastikan mengandung unsur hara mikro asalkan berasal dari campuran beberapa pupuk kandang.
- Kompos, merupakan hasil penguraian dari bahan-bahan organik seperti daun, jerami, dan sisa tanaman. Kompos mengandung nutrisi dan mikroba yang bermanfaat bagi tanah. Penggunaan kompos dapat meningkatkan struktur tanah dan memperbaiki retensi air. Kompos yang berasal dari limbah rumah tangga dipastikan mempunyai kualitas yang lebih baik karena jenis limbahnya yang berasal dari aneka sayuran dan buah-buahan.
- *Biochar*, atau arangbio adalah arang yang dihasilkan dari proses pirolisis. Satu pelajaran penting dari proses ini adalah tanah *Terra Preta* yang dikenal juga sebagai *Amazonian Dark Earth*. Tanah ini terdapat di Lembah Amazon, terkenal karena kaya dengan unsur hara dan kesuburannya yang luar biasa. Berbeda dengan tanah-tanah sekitarnya yang tidak subur, *Terra Preta* memiliki warna gelap, tekstur lempung, dan penuh dengan kehidupan mikroba. Amandemen organik yang dilakukan oleh masyarakat adat Amazon antara 450 SM dan 950 M

berkontribusi pada pembentukan tanah ini. Mereka menambahkan bahan-bahan seperti arang dari api berintensitas rendah untuk memasak, tulang hewan, pecahan tembikar, kompos, dan pupuk kandang ke dalam tanah yang awalnya miskin. Hasilnya adalah tanah yang sangat subur karena mengandung unsur hara dan bahan organik stabil yang berasal dari arang, sehingga memberikan warna hitam yang khas. Para ilmuwan di Brasil menemukan bahwa *Terra Preta* menjadi senjata rahasia untuk mempercepat pemulihan hutan di seluruh dunia. Penambahan *Terra Preta* ke dalam tanah dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, bukan hanya di Amazon, tetapi juga di berbagai wilayah lain di dunia. *Terra Preta* mengandung unsur hara yang tinggi dan mikroorganisme yang menguntungkan, sehingga dapat membantu dalam proyek restorasi ekologi dan reboisasi.

Amandemen organik memainkan peran penting dalam menentukan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Berikut adalah beberapa aspek peran amandemen organik pada tanah:

- Meningkatkan kesuburan tanah. Bahan organik dari amandemen organik membantu meningkatkan kesuburan tanah dengan menyediakan unsur hara dan memperbaiki struktur tanah. Kandungan unsur hara makro dalam bahan organik, seperti N, P, dan K memberikan dukungan vital bagi pertumbuhan tanaman.
- Memperbaiki struktur tanah. Amandemen organik membantu mengurangi kepadatan tanah dan meningkatkan porositas. Tanah yang lebih *porous* memungkinkan akar tanaman untuk tumbuh lebih baik dan memperoleh lebih banyak air dan O₂.



Gambar 15. *Terra Preta* di Lembah Amazon merupakan contoh praktik yang baik untuk konservasi bahan organik tanah. Sumber: Anonymous, 2024.

- Meningkatkan kemampuan menahan air. Bahan organik dapat meningkatkan kapasitas tanah untuk memegang air. Keadaan ini membantu menjaga kelembaban tanah dan memastikan ketersediaan air bagi tanaman.
- Memperbaiki media perkembangan mikroba tanah. Bahan organik memberikan lingkungan yang baik bagi mikroorganisme tanah. Mikroba ini berperan dalam menguraikan bahan organik, menghasilkan unsur hara, dan memperbaiki struktur tanah.

- Mengurangi erosi tanah. Amandemen organik membantu mengurangi erosi tanah dengan meningkatkan daya tahan tanah terhadap aliran air permukaan (*run off*) dan angin.
- *Biochar* atau arangbio, sebagai salah satu bentuk amandemen organik, juga memiliki manfaat khusus. Arangbio dapat memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air, dan meningkatkan ketersediaan unsur hara. Selain itu, arangbio membantu tanah mempertahankan nutrisi penting dan mendukung pertumbuhan tanaman.

5.2 Pengaruhnya terhadap Sifat Tanah

Bahan organik tanah memiliki peran yang signifikan dalam memengaruhi sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Gambar 14 pada halaman 40 memberikan infografik holistik tentang pengaruh bahan organik terhadap sifat tanah. Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai pengaruh bahan organik terhadap tanah:

- Sifat fisik tanah. Di dalam sifat fisik ini struktur tanah mungkin menjadi faktor yang paling dipengaruhi oleh keberadaan bahan organik tanah. Bahan organik membantu memperbaiki struktur tanah dengan mengurangi kepadatan tanah dan meningkatkan agregasi partikel tanah. Tanah yang kaya bahan organik cenderung memiliki struktur yang lebih baik. Kedua adalah porositas tanah, karena bahan organik meningkatkan porositas tanah dengan membentuk ruang pori yang memungkinkan sirkulasi udara dan air menjadi lebih baik. Hal ini penting untuk pertumbuhan akar tanaman dan aktivitas mikroba. Ketiga, kapasitas penyimpanan air. Bahan organik dapat menahan air dan mengurangi risiko kekeringan. Tanah yang kaya bahan organik dapat menyimpan lebih banyak air.

- Sifat kimia tanah. Ketersediaan unsur hara adalah faktor yang paling dipengaruhi karena adanya bahan organik. Hal ini disebabkan karena bahan organik secara langsung menyediakan unsur hara makro seperti N, P, dan K. Proses dekomposisi bahan organik melepaskan unsur hara makro dan mikro ke dalam tanah, yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Kedua, kapasitas tukar kation (KTK). Bahan organik meningkatkan KTK tanah atau kemampuan tanah untuk menjerap dan melepaskan kation unsur hara seperti Ca, Mg, dan K.
- Sifat biologi tanah. Aktivitas mikroba adalah sifat biologi tanah yang paling dipengaruhi oleh bahan organik. Bahan organik adalah sumber energi bagi mikroorganisme tanah. Aktivitas mikroba membantu menguraikan bahan organik menjadi unsur hara yang dapat diserap oleh tanaman. Kedua, keanekaragaman hayati. Bahan organik mendukung keberagaman hayati tanah dengan menyediakan tempat tinggal dan makanan bagi organisme seperti cacing tanah, serangga, dan bakteri.

Sangat penting untuk memperhatikan keseimbangan bahan organik dalam tanah. Kekurangan bahan organik dapat mengakibatkan degradasi tanah, sedangkan kelebihan dapat mempengaruhi keseimbangan unsur hara struktur tanah. Oleh karena itu, praktik pengelolaan tanah yang memperhatikan bahan organik sangat penting agar dapat menjaga kesuburan tanah dan produktivitas pertanian.

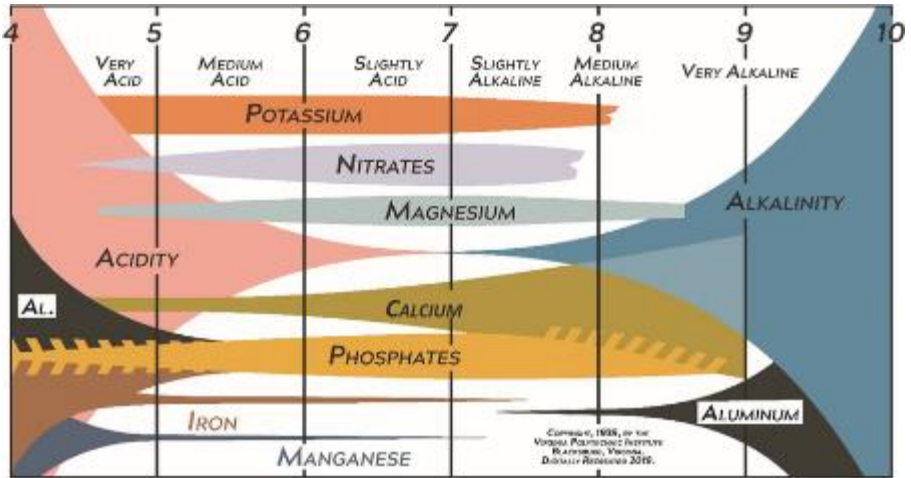
5.3 Pengaruhnya terhadap Unsur Hara

Bahan organik tanah berperan penting dalam hubungan dengan unsur hara di tanah. Berikut adalah beberapa hubungan antara bahan organik tanah dengan unsur hara:

- Sumber unsur hara. Bahan organik tanah, seperti sisa tanaman, humus, dan bahan hewan, adalah sumber utama

unsur hara di dalam tanah. Ketika bahan organik ini terurai oleh mikroorganisme tanah, unsur hara seperti N, P, dan K dilepaskan ke dalam tanah dan menjadi tersedia bagi tanaman.

- Kapasitas jerapan unsur hara. Bahan organik tanah dapat meningkatkan kapasitas jerapan atau adsorpsi kation tanah, yaitu kemampuan tanah untuk menahan unsur hara dalam bentuk kation seperti K, Mg, dan Ca. Dengan demikian, bahan organik membantu mempertahankan unsur hara dalam tanah dan mencegah pencucian.
- Ketersediaan unsur hara. Bahan organik tanah membantu menjaga keseimbangan pH tanah, yang mempengaruhi ketersediaan unsur hara bagi tanaman. pH tanah yang seimbang memungkinkan tanaman untuk menyerap unsur hara dengan lebih efisien.
- Stimulasi aktivitas mikroorganisme. Bahan organik tanah merangsang aktivitas mikroorganisme tanah, yang pada gilirannya berperan dalam proses mineralisasi dan nitrifikasi. Proses-proses ini membuat unsur hara menjadi lebih tersedia bagi tanaman.
- Peningkatan struktur tanah. Bahan organik tanah membantu meningkatkan struktur tanah, sehingga memungkinkan akar tanaman untuk tumbuh lebih baik dan menyerap unsur hara dengan lebih efisien.



Gambar 16. Ilustrasi hubungan antara kemasaman tanah (pH) dengan ketersediaan unsur hara. Sumber: Hartemink & Barrow, 2023.

Butir satu dan tiga merupakan satu kesatuan pengaruh yang paling mendasar dari bahan organik tanah. Keduanya tergantung pada kemasaman tanah (pH) yang menjadi penentu kelarutan unsur hara di dalam tanah. Oleh karena itulah Gambar 15 di atas menjadi acuan dasar untuk pengertian lebih lanjut tentang ketersediaan unsur hara di dalam tanah.

Secara keseluruhan, bahan organik tanah sangat penting untuk mendukung ketersediaan dan penyerapan unsur hara oleh tanaman, sehingga berkontribusi pada kesuburan tanah dan produktivitas pertanian.

6 DEKOMPOSISI DAN PERSISTENSI

Dekomposisi bahan organik adalah proses biokimia di mana organisme pengurai, seperti bakteri dan jamur, menguraikan bahan organik menjadi senyawa sederhana seperti karbon dioksida, air, dan nutrisi. Proses ini memungkinkan siklus materi berlanjut dengan mengembalikan nutrisi ke lingkungan, yang kemudian dapat diserap kembali oleh tanaman dan makhluk hidup lainnya.

Persistensi bahan organik mengacu pada kemampuan bahan organik untuk bertahan dalam lingkungan tanpa terdekomposisi. Ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk komposisi kimia bahan organik, kondisi lingkungan, dan aktivitas mikroorganisme pengurai. Bahan organik yang persisten cenderung lebih resistan terhadap dekomposisi dan dapat tetap ada dalam tanah atau sedimen untuk periode waktu yang lama.

6.1 Umur Bahan Organik Tanah

Umur bahan organik tanah mengacu pada waktu yang dibutuhkan untuk bahan organik tersebut terdekomposisi dan terintegrasi ke dalam tanah. Ini bisa berkisar dari beberapa tahun hingga beberapa dekade, tergantung pada berbagai faktor, termasuk:

- Jenis bahan organik. Beberapa jenis bahan organik, seperti lignin, lebih resistan terhadap dekomposisi dibandingkan dengan bahan organik lainnya seperti selulosa.
- Kondisi lingkungan. Suhu, kelembaban, dan pH tanah mempengaruhi aktivitas mikroorganisme pengurai dan kecepatan dekomposisi.
- Aktivitas biologis. Keanekaragaman dan aktivitas mikroorganisme di dalam tanah, termasuk bakteri, jamur, dan invertebrata tanah, memainkan peran penting dalam proses dekomposisi.

- Manajemen tanah. Praktik pertanian, seperti pengolahan tanah dan pemupukan, dapat mempengaruhi umur bahan organik dengan mengubah struktur tanah dan ketersediaan oksigen.

Penelitian telah menunjukkan bahwa bahan organik tanah pada lahan yang direklamasi dari bekas tambang batubara menunjukkan peningkatan kandungan bahan organik seiring dengan bertambahnya umur reklamasi. Ini menunjukkan bahwa proses restorasi ekosistem dapat memperbaiki kualitas bahan organik tanah seiring waktu.

Lebih jauh, pemahaman tentang umur bahan organik tanah penting untuk mengelola kesuburan tanah dan siklus nutrisi dalam sistem agroekosistem.

6.2 Hilangnya Bahan Organik Tanah Baru

Hilangnya bahan organik baru pada tanah dapat terjadi karena beberapa faktor, termasuk:

- Erosi. Erosi tanah oleh air, angin, dan aktivitas manusia dapat menghilangkan unsur hara organik dan mineral dari lapisan permukaan tanah.
- Dekomposisi. Proses biologis di mana mikroorganisme menguraikan bahan organik, menghasilkan CO₂, air, dan nutrisi lainnya yang dilepaskan ke atmosfer atau diserap kembali oleh tanah.
- Penggunaan lahan. Praktik pertanian yang tidak mempertahankan atau meningkatkan kandungan bahan organik tanah dapat menyebabkan penurunan produktivitas dan kesuburan tanah dalam jangka panjang.
- Kondisi lingkungan. Faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan pH tanah mempengaruhi laju dekomposisi bahan organik dan ketersediaannya bagi tanaman.

Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya kehilangan bahan organik tanah bisa digunakan untuk acuan konservasinya.

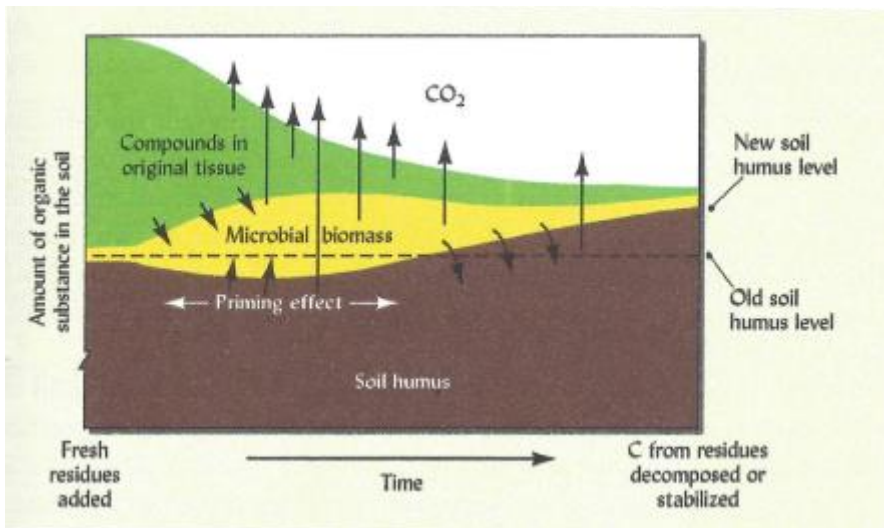
Hanya dengan perlakuan sebaliknya dari proses kehilangan, maka bahan organik tanah akan dapat dipertahankan keberadaannya. Dengan demikian, manfaat bahan organik akan terus dapat dipetik.

Pemahaman tentang proses-proses ini juga penting untuk pengelolaan tanah yang berkelanjutan dan pelestarian kesuburan tanah.

6.3 *Priming Effect*

Priming effect adalah peningkatan atau penurunan laju dekomposisi bahan organik tanah setelah penambahan bahan organik segar. Hal ini sering dikaitkan dengan perubahan aktivitas mikroba karena ketersediaan energi dari bahan organik segar. Namun, faktor lain seperti stabilitas bahan organik tanah, komposisi komunitas mikroba, dan kondisi lingkungan juga dapat mempengaruhi *priming effect*. Eksudat akar yang merupakan hasil metabolisme akar tumbuhan juga bisa dipengaruhi oleh *priming effect* ini. Ketika bahan organik segar ditambahkan pada tanah, maka akan terjadi penambahan energi dan unsur hara yang membuat dekomposisi bahan organik tanah yang lebih tua menjadi lebih cepat terurai.

Priming effect pada sistem lahan basah tidak banyak diketahui, tetapi penelitian terakhir memperlihatkan indikasi kalau *priming effect* ini berpengaruh pada siklus C dan ketersediaan hara. *Priming effect* bisa berpengaruh positif dan negatif pada penyimpanan C. Di satu sisi, hal itu dapat menyebabkan hilangnya bahan organik tanah lama, yang dapat mengurangi penyimpanan C tanah dari waktu ke waktu. Di sisi lain, dapat meningkatkan pergantian bahan organik tanah, yang mengarah pada akumulasi bentuk bahan organik yang lebih stabil dalam jangka panjang.



Gambar 17. Ilustrasi perubahan fraksi C ketika terjadi penambahan bahan organik segar. Sumber: Nyle C. Brady, 2017.

Priming effect di lahan basah diprediksi mirip dengan yang ada di ekosistem lain, di mana penambahan bahan organik segar merangsang dekomposisi bahan organik yang lebih tua dan lebih resistan. Namun, di lahan basah, *priming effect* bisa lebih terasa karena kondisi anaerobik yang unik dari ekosistem ini.

Di lahan basah, ketersediaan O_2 sangat terbatas, dan sebagian besar dekomposisi bahan organik terjadi melalui proses anaerobik. Hal ini menghasilkan produksi asam organik, seperti asam asetat dan propionat, yang dapat meningkatkan kelarutan bahan organik yang lebih tua dan bandel dan membuatnya lebih mudah diakses untuk degradasi mikroba. Penambahan bahan organik segar ke tanah lahan basah juga dapat menyediakan sumber akseptor elektron, seperti NO_3 dan SO_4 , yang dapat merangsang aktivitas mikroba dan meningkatkan dekomposisi bahan organik segar dan lama.

Efek utama di lahan basah dapat memiliki implikasi penting bagi siklus C dan siklus hara di ekosistem ini. Ini dapat memengaruhi jumlah C dan nutrisi yang tersimpan di lahan basah serta jumlah gas rumah kaca seperti CO_2 dan CH_4 .

Secara spesifik dan ringkas, *priming effect* dapat:

- Meningkatkan dekomposisi bahan organik. Jika bahan organik yang ditambahkan kaya akan nutrisi, hal ini dapat menyediakan sumber energi tambahan bagi mikroba, yang memungkinkan mereka untuk lebih aktif dan mempercepat dekomposisi bahan organik lainnya.
- Menurunkan dekomposisi. Sebaliknya, jika bahan organik yang ditambahkan bersifat kompleks dan sulit dicerna oleh mikroba, hal ini dapat mengurangi laju dekomposisi karena mikroba menghabiskan energi lebih banyak untuk mendekomposisi bahan tersebut.

Priming effect penting dalam pengelolaan kesuburan tanah karena dapat mempengaruhi jumlah C dan nutrisi yang tersedia bagi tanaman. Oleh karena itu, pemahaman tentang *priming effect* dapat membantu dalam menentukan strategi yang tepat untuk pemberian bahan organik dan manajemen tanah yang berkelanjutan.

7 SIKLUS FOSFOR DALAM HUBUNGANNYA DENGAN BAHAN ORGANIK TANAH

Siklus P adalah proses biogeokimia yang penting dalam ekosistem karena P merupakan unsur hara esensial yang dibutuhkan oleh semua makhluk hidup. Dalam hubungannya dengan bahan organik tanah, siklus P melibatkan beberapa tahapan utama:

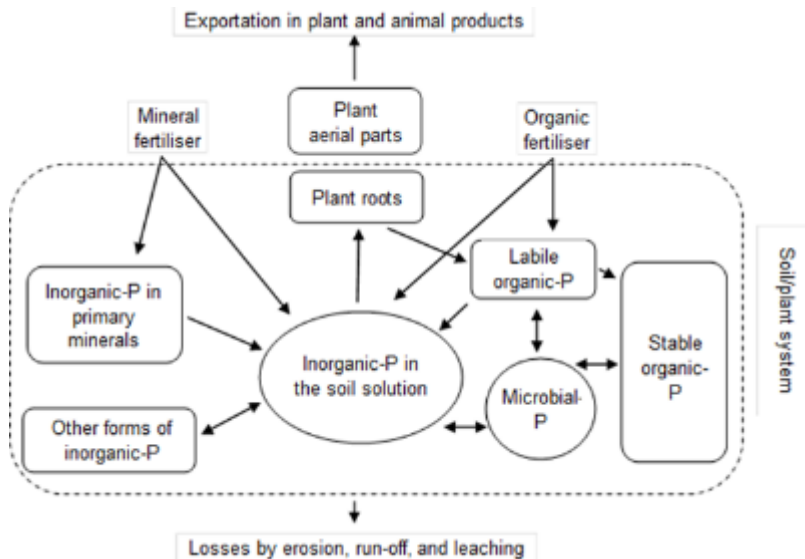
- Pelapukan batuan. Fosfor dilepaskan dari batuan PO_4 melalui proses pelapukan dan erosi, kemudian masuk ke dalam tanah.
- Penyerapan oleh tanaman. Tanaman menyerap P dari dalam tanah, yang digunakan untuk pertumbuhan dan fungsi biologis seperti pembentukan ATP dan asam nukleat.
- Dekomposisi. Ketika organisme mati, P yang terkandung dalam tubuhnya dikembalikan ke tanah melalui proses dekomposisi oleh mikroorganisme.
- Mineralisasi. Bakteri di dalam tanah memecah bahan organik menjadi bentuk P-anorganik, yang dikenal sebagai proses mineralisasi. Bentuk ini akan mengalami proses lanjutan agar bisa lebih tersedia bagi tumbuhan.
- Imobilisasi dan remobilisasi. Fosfor organik di dalam tanah dapat diimobilisasi atau terikat dalam bentuk organik yang tidak tersedia bagi tanaman. Proses ini dapat dibalik, dimana P-organik kembali menjadi bentuk P-anorganik yang dapat diserap oleh tanaman.
- Pengaruh bahan organik. Penambahan bahan organik ke tanah dapat meningkatkan ketersediaan P dengan cara mengikat kation seperti Al dan Fe melalui ikatan khelasi,

sehingga P dapat tersedia bagi tanaman. Proses ini sangat nyata terjadi pada jenis tanah yang mengandung Al dan Fe yang tinggi seperti tanah Ultisols dan Oxisols yang banyak terdapat pada lahan kering dan kritis yang juga dikenal sebagai lahan sub optimal.

- Sedimentasi. Fosfor yang tercuci ke saluran air dapat berakhir di lautan dan mengalami proses sedimentasi dari waktu ke waktu.

Siklus P tidak melibatkan atmosfer secara signifikan karena P tidak mudah menguap atau terdistribusi melalui udara. Oleh karena itu, siklus P terutama terjadi di litosfer, hidrosfer, dan biosfer.

Pemahaman tentang siklus P sangat penting dalam pengelolaan tanah dan pertanian, karena memungkinkan kita untuk mengoptimalkan pemanfaatan P dan mempertahankan kesuburan tanah (Yusran et al., 2021).



Gambar 18. Siklus fosfor di dalam tanah berdasarkan klasifikasi pembentukannya.

7.1 Disolusi dan Presipitasi

Siklus P berawal dari bahan induk, iklim, dan waktu sebagai faktor yang mempengaruhi keberadaan dan konsentrasinya dalam tanah. Disolusi P dari bahan asalnya dapat dijelaskan sebagai penguraiannya dari mineral apatit $[Ca_{10}X_2(PO_4)_6]$, di mana $X = OH^-$ atau F^- , Ca bisa juga diganti dengan Na atau Mg, dan PO_4 dengan CO_3 yang merupakan mineral primer P paling umum. Presipitasi P dengan Ca-karbonat dan adsorpsi pada oksida-Al dan -Fe telah dikenal sejak pertengahan abad kesembilan belas. CaP terbentuk setelah adsorpsi P ke permukaan kalsit. Setelah P teradsorpsi ke permukaan kalsit, monokalsium fosfat $[Ca(H_2PO_4)_2]$ mengendap dan membentuk dikalsium fosfat dihidrat $(CaHPO_4 \cdot 2H_2O)$, kemudian oktokalsium $[Ca_8H_2(PO_4)_6 \cdot 5H_2O]$, dan akhirnya menjadi hidroksiapatit $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$. Adsorpsi P pada oksida Al dan Fe mengakibatkan pembentukan Al-P dan Fe-P yang bersifat amorf, yang kemudian dapat berubah menjadi *variscite* $(AlPO_4 \cdot 2H_2O)$ dan *strengite* $(FePO_4 \cdot 2H_2O)$. Adsorpsi P tidak hanya dihubungkan dengan oksida Al dan Fe, tetapi juga dengan liat tipe 1:1 seperti kaolinit, terutama pada tanah tropika masam (Dubus & Becquer, 2001).

Disolusi apatit membutuhkan H^+ , yang berasal dari akar tanaman, mikro-organisme, atau dari tanah itu sendiri. Sementara itu, disolusi P dari presipitasi dengan Ca, Al, dan Fe bisa juga berlangsung dan dapat membuat P lebih tersedia bila bahan organik ditambahkan ke dalam tanah. Kedua disolusi ini tergantung pada asam organik seperti sitrat dan asam format sebagai sumber H^+ untuk menukar posisi P pada hidroksida logam.

7.2 Sorpsi dan Desorpsi

Istilah sorpsi digunakan untuk menggambarkan akumulasi P pada permukaan partikel tanah yang bisa pula dibarengi dengan penetrasi P karena difusi ke dalam adsorben, sehingga mengakibatkan adsorpsi lanjutan. Kedua proses (sorpsi-desorpsi)

terjadi secara simultan. Desorpsi didefinisikan sebagai pelepasan ion P sebagai reaksi dari proses sorpsi di atas. Proses sorpsi ini berlangsung dalam dua tahapan, yaitu penyerapan awal yang berlangsung cepat dalam satuan menit atau jam. Tahapan kedua adalah reaksi yang berlangsung lambat dalam hitungan minggu atau bulan. Terdapat dua mekanisme kimia yang bertanggung-jawab untuk proses tersebut:

- Pertukaran ion, yaitu mekanisme elektrostatis anion P ke permukaan partikel tanah bermuatan positif yang ada pada permukaan liat bermuatan ganda, di bawah titik muatan nol, dan
- Pertukaran ligan, yaitu mekanisme di mana satu anion P menggantikan permukaan hidroksil yang dikoordinasikan dengan kation logam.

Mekanisme pertukaran ligan ini juga disebut sebagai adsorpsi spesifik dan ditandai oleh:

- Adsorpsi yang disertai dengan pelepasan OH^- ,
- Pertukaran ligan dengan tingkat spesifikasi tinggi,
- Tahapan adsorpsi terjadi lebih cepat daripada desorpsi yang menyebabkan histeresis isothermal, dan
- Adsorpsi disertai dengan peningkatan muatan negatif.

Sorpsi kedua atau fase lambat diperkirakan memiliki dua mekanisme, yaitu difusi (baik ke dalam kumpulan partikel tanah atau permukaannya), dan presipitasi (baik oleh nukleasi langsung atau setelah disolusi inangnya di awal adsorpsi).

Proses sorpsi-desorpsi P adalah mekanisme yang penting dalam pengelolaan fase padat dan fase cair tanah serta memiliki implikasi penting untuk dinamika P. Mekanisme ini sering disebut kapasitas penyangga P, yang menggambarkan kapasitas tanah untuk mengatur perubahan konsentrasi P bila dilakukan pemupukan atau bahkan bila terjadi pencucian dan erosi P.

Dalam hubungannya dengan penambahan bahan organik, pelepasan P pada saat mineralisasi mungkin sulit untuk dibedakan dengan proses sorpsi, terutama pada tanah dengan kapasitas fiksasi tinggi seperti tanah Ultisols dan Oxisols yang lebih dikenal dengan nama tanah Podsolik Merah Kuning. Hal ini bukan hanya karena tingginya kandungan seskuioksida dan kandungan liat tipe 1:1 dalam tanah, tetapi juga karena konsentrasi bahan organik yang sangat sedikit. Namun, dengan mengamati lepasnya P-tersedia dan menentukan adsorpsi isotermalnya, kedua proses dapat dipisahkan. Selanjutnya, pengaruh baham organik terlarut pada pelepasan P pada tanah Oxisols bersifat sementara, hal ini membuat pertanyaan apakah gambut akan memiliki efek jangka panjang pada adsorpsi P karena ketahanan terhadap dekomposisi. Pada saat yang sama gambut mungkin dapat secara perlahan-lahan melepaskan ligan organik terlarut yang bersaing untuk posisi adsorpsi dengan P.

7.3 Fosfor Organik

Fosfor organik di dalam tanah adalah P yang terkandung dalam bahan organik dan humus. Fosfor ini dilepaskan ke dalam tanah melalui proses mineralisasi, yang melibatkan organisme tanah seperti bakteri yang memecah bahan organik menjadi bentuk P-anorganik yang dapat diserap oleh tumbuhan. Proses mineralisasi ini sangat dipengaruhi oleh kelembaban tanah dan suhu.

Penambahan bahan organik ke dalam tanah dapat meningkatkan ketersediaan P karena asam organik hasil dari dekomposisi bahan organik memiliki kemampuan dalam mengikat kation seperti Al dan Fe, yang pada gilirannya mengurangi fiksasi P oleh partikel tanah dan meningkatkan ketersediaan P bagi tanaman.

Fosfor organik di dalam tanah dapat mencakup beberapa komponen seperti: Inositol fosfat (2-50%), asam nukleat (0,2-2,5 %), fosfolipida (1-5%), fosfoprotein, dan fosfat metabolik. Namun, tidak ada klasifikasi yang spesifik yang pernah dibuat oleh ahli tanah. Yang jelas, P-organik di dalam tanah merupakan bagian dari siklus P dan berperan penting dalam produktivitas dan kesuburan tanah.

7.3.1 Faktor Ketersediaan

Beberapa faktor yang memengaruhi ketersediaan P-organik bagi tanaman meliputi:

- Kemasaman tanah (pH tanah). Kelarutan senyawa P dipengaruhi oleh pH tanah. Fosfor dapat berasosiasi dengan Fe, Al, dan Mn yang memiliki kelarutan rendah di air, terutama di tanah yang masam.
- Tingkat lengas tanah atau kelembapan. Peningkatan lengas tanah yang optimum akan meningkatkan ketersediaan P bagi tanaman.
- Bahan organik. Penambahan bahan organik ke dalam tanah dapat mempengaruhi ketersediaan P dengan mengubah pH, meningkatkan jumlah P-tersedia, dan mengurangi jerapan P oleh Al dan Fe di dalam tanah.
- Aktivitas mikroorganisme. Bakteri pelarut P (BPF) memiliki kemampuan untuk melarutkan P dalam tanah dari bentuk yang tidak larut menjadi bentuk larut, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara P dalam tanah.

Faktor-faktor lain seperti sifat/komponen tanah, pengaruh kation dan anion, kejenuhan kompleks jerapan, temperatur, dan waktu pemberian P juga berperan dalam fiksasi dan ketersediaan P bagi tanaman.

7.3.2 Fosfor Biomassa Mikroba

Fosfor biomassa mikroba (MBP = *Microbial Biomass P*) merujuk pada P yang terkandung dalam biomassa mikroorganisme, terutama dalam konteks pengolahan limbah dan kesuburan tanah. Dalam pengolahan limbah, bakteri tertentu yang dikenal sebagai organisme pengakumulasi P (PAO = *Polyphosphorus Accumulating Organisms*) memainkan peran penting dalam akumulasi biologis P. Organisme ini membutuhkan kondisi aerobik/anaerobik yang bergantian untuk berkembang dan dapat mengakumulasi P dalam biomassa lumpur berlebih.

Di dalam tanah, MBP adalah komponen penting dari kesuburan tanah. MBP mencerminkan jumlah P yang terkandung dalam biomassa mikroba tanah dan dapat berfungsi sebagai indeks untuk ketersediaan P tanah. MBP dipengaruhi oleh masukan C dan P dan berkorelasi positif dengan hasil panen dan serapan P oleh tanaman.

Fosfor penting bagi semua kehidupan, sehingga terdapat dalam semua biomassa hingga batas tertentu. Fosfor ditemukan dalam bentuk organik dan anorganik dalam biomassa, dan tingkatnya dapat bervariasi tergantung pada jenis biomassa. Misalnya, sisa pertanian, biomassa hewan, dan lumpur limbah dapat mengandung konsentrasi P yang tinggi. Dalam konteks konversi termal biomassa, konsentrasi P yang tinggi bisa menjadi masalah operasional.

Secara keseluruhan, MBP adalah faktor kunci dalam pengelolaan lingkungan dan produktivitas pertanian, memainkan peran penting dalam siklus nutrisi dan keberlanjutan ekosistem.

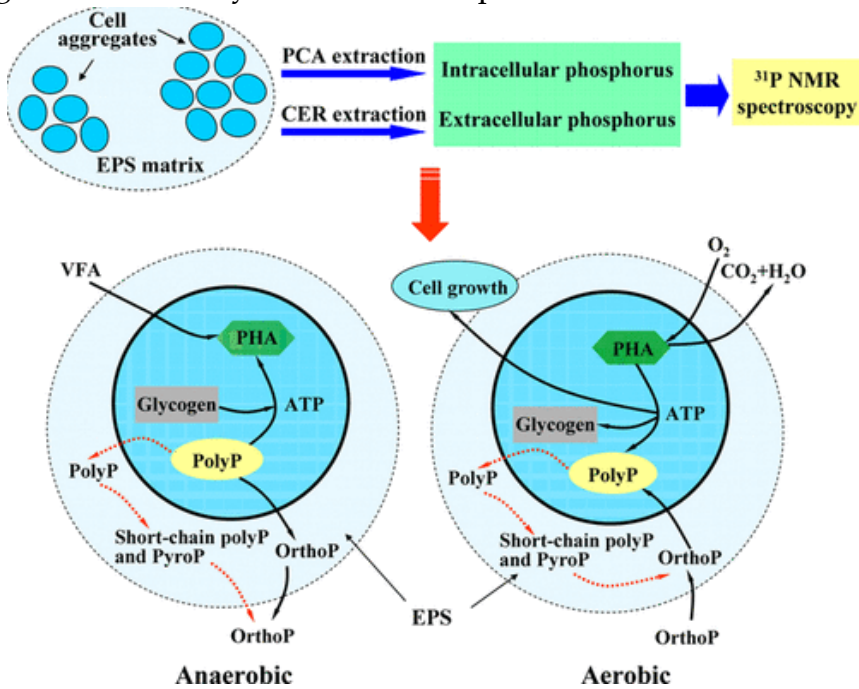
Beberapa mikroorganisme yang mampu menyerap P termasuk:

- *Accumulibacter*, adalah jenis PAO yang paling mudah ditemukan dan dianggap sebagai kelompok yang paling

penting dalam proses pembersihan P. Bakteri ini mampu mengambil P dan menyimpannya di dalam sel mereka .

- Keluarga *Competibacteraceae* dan *Defluviicoccus* GAO, juga dianggap penting untuk proses pembersihan P.
- Selain *Acinetobacter*, mikroorganisme lain yang mampu mengakumulasi polifosfat (*polyP*) dan berguna dalam proses pembersihan P biologis.

Kelompok mikroorganisme ini memiliki peran kunci dalam siklus P, terutama dalam sistem pengolahan limbah, di mana mereka membantu membersihkan P dari air limbah dengan mengakumulasi polifosfat intraseluler.



Gambar 19. Proses penyerapan fosfor di dalam bakteri pembersih fosfor pada yang dipakai pada instalasi pengolahan limbah. Sumber: Zhang et al., 2013.

7.3.3 Fosfatase

Enzim fosfatase tanah diproduksi oleh akar tanaman dan mikroorganisme dan memainkan peran penting dalam siklus P,

yang sering kali menjadi elemen pembatas dalam ekosistem darat. Produksi enzim-enzim ini di dalam tanah merupakan strategi biologis terpenting untuk memperoleh unsur hara P dari molekul organik. Penelitian sebelumnya menunjukkan bagaimana aktivitas fosfatase tanah didorong oleh kondisi iklim, kandungan N dan C di dalam tanah. Meskipun demikian, tren aktivitas enzim-enzim ini di masa depan dalam perubahan global masih sangat sedikit diketahui.

Peran fosfatase merupakan bagian integral dari peran aktivitas mikroba dalam tanah. Sehubungan dengan mineralisasi P dari bahan organik tanah, pengaruh aktivitas mikroba tanah menjadi bagian integral dari mineralisasi, asimilasi, atau imobilisasi mikroba dalam siklus P.

Fosfatase, baik fosfatase asam maupun basa, mampu mengubah P-organik menjadi P-anorganik dan melepaskannya. Transformasi ini bahkan lebih terlihat pada tanah dengan konsentrasi P yang rendah atau pada akar tanaman yang kekurangan hara P. Aktivitas fosfatase dipengaruhi oleh beberapa karakteristik tanah. Kandungan bahan organik tanah, konsentrasi P, populasi mikroba, dan pH tanah menjadi faktor yang paling berpengaruh (Marinari et al., 2000). Dalam kondisi optimal, fosfatase dapat memiliki waktu paruh empat minggu.

Beberapa jenis tanah di Australia Barat bersifat laterit, dicirikan oleh jumlah P-tersedia yang rendah di mana bahan organik labil dan fraksi P-mikroba mendominasi jumlah P di permukaan tanah. Oleh karena itu, mineralisasi P-organik dan pergantian biomassa mati, serta fosfatase, cenderung mengontrol ketersediaan P. Dengan analogi yang sama, tanah lahan kering sub optimal yang banyak terdapat di Indonesia (terutama Kalimantan, Sumatra, dan Papua) pastilah menunjukkan kecenderungan yang sama dengan tanah di sana.

7.3.4 Bahan Organik Baru dan Lama

Banyak penelitian menemukan bahwa ketersediaan P untuk tumbuhan dapat ditingkatkan dengan penambahan bahan organik melalui beberapa mekanisme. Sebagian besar mekanisme terkait dengan reaksi biokimia di mana mikro-organisme tanah berpartisipasi secara aktif.

Dalam beberapa penelitian, penambahan bahan organik ke tanah memengaruhi adsorpsi P. Sebagai residu organik terurai, P-larut dilepaskan dan dijerap ke permukaan oksida. Dalam jangka panjang, senyawa humat dari dekomposisi bahan organik dapat membentuk kompleks dengan Fe, Al, dan pada tingkat yang lebih rendah Ca untuk menyerap P, bisa dengan pembentukan senyawa terner (asam humat-logam- PO_4). Kompleksasi Al oleh bahan organik yang baru ditambahkan mengurangi konsentrasi Al-tukar dan larut. Pada tanah dengan serapan P tinggi, adsorpsi P biasanya meningkat mengikuti penambahan residu organik. Tetapi, pada tanah dengan serapan P rendah, adsorpsi biasanya menurun, tergantung pada jenis residu yang diterapkan. Kapasitas penyerapan P meningkat dengan lamanya inkubasi dan menurun dengan meningkatnya kandungan P dalam residu.

7.3.5 Perpindahan fosfat

Proses lain yang bertanggung jawab atas pelepasan P dari bahan organik yang ditambahkan ke tanah adalah perpindahan ion ortofosfat dengan ligan atau anion organik. Ligan organik ini berasal dari sisa tanaman yang memiliki metabolit penting asam di- dan tri-karboksilat seperti asam oksalat, oksalo-asetat, malat, fumarat, suksinat, α -cetoglutaric, isocitric, dan sitrat (Hinsinger, 2001). Ligan organik ini tidak hanya bersaing dengan P untuk tempat jerapan, tetapi juga mengurangi jumlah Al- dan Fe-P dalam tanah. Beberapa ligan organik seperti asam hidroksi aromatik dan asam hidroksi alifatik efektif dalam mencegah P bergabung secara kimiawi dengan Al dan Fe atau dalam perpindahan P.

Dalam proses perpindahan, pertukaran ligan juga merupakan mekanismenya. Ligan permukaan dalam tanah tidak terbatas pada hidroksil dan air. Ligan seperti SO_4 dan SiO_4 juga dapat bertukar dengan PO_4 dan mempengaruhi adsorpsi P. Pada tanah yang didominasi oleh senyawa Fe dan Al amorf, PO_4 efektif menggantikan SO_4 dan SiO_4 serta ion hidroksil selama fase adsorpsi cepat.

7.3.6 Pencucian Fosfor

Pencucian P merupakan mekanisme penting penghilangan P dari tanah setelah fiksasi P dan presipitasi. Seperti halnya pencucian menghilangkan P di luar sistem tanah-tanaman, efek pencucian dapat mengganggu keseimbangan antara genangan P dalam jangka panjang. Karena P juga biasanya merupakan hara pembatas utama pada tanah laterit, pengangkutan P dari tanah ke badan air melalui pencucian perlu dihindari, terutama jika pupuk P diterapkan pada tanah.

Secara umum diasumsikan bahwa terdapat sedikit atau tidak ada pergerakan P vertikal atau pencucian dalam tanah, karena tingginya kapasitas fiksasi dari banyak tanah mineral termasuk Ultisols dan Oxisols. Erosi tanah yang disebabkan oleh limpasan permukaan biasanya dianggap sebagai mekanisme utama hilangnya P dari tanah menjadi air. Pencucian P dianggap tidak signifikan dan tidak penting dari sudut pandang agronomi dan lingkungan. Namun, studi terbaru menunjukkan bahwa konsentrasi pencucian P di bawah permukaan lebih tinggi dari yang diyakini sebelumnya. Telah diketahui bahwa pencucian P biasanya terjadi karena kombinasi faktor-faktor seperti praktik pengelolaan pertanian, sifat tanah, dan kondisi iklim. Oleh karena itu, pencucian P dapat terjadi di tanah mana pun, tidak hanya dari area pertanian yang banyak digunakan, tetapi juga di tanah organik dan mineral.

Berkenaan dengan tanah laterit, studi pencucian P telah difokuskan dalam kaitannya dengan adsorpsi P karena hidroksida

Al dan Fe. Adsorpsi ini dapat memperlambat pencucian P dengan asumsi bahwa adsorpsi itu sendiri belum mencapai kejenuhan. Kandungan seskuioksida (Al dan Fe) dapat digunakan sebagai prediktor terbaik pencucian P. Dengan cara yang lebih canggih, model telah dikembangkan dengan indeks tervalidasi untuk memprediksi kehilangan P berdasarkan indeks P, data uji tanah, potensi erosi dan limpasan tanah, dan tingkat aplikasi pupuk P atau limbah organik, metode, dan waktu.

Kekhawatiran berkembang karena pencucian P mempercepat eutrofikasi air tawar. Saat ini, beberapa upaya telah dilakukan untuk menargetkan daerah sumber kritis transpor P, di mana konsentrasi P tinggi ditemukan di tanah karena limpasan permukaan atau aliran pori makro bawah permukaan.

Dalam studi rinci pencucian P, aliran pori makro bawah permukaan atau aliran preferensial telah didokumentasikan dengan baik melalui tanah berpasir, dan pada tanah bertekstur baik dan bertekstur halus. Mekanisme pencucian ini didominasi oleh aliran preferensial melalui pori makro tanah. Di daerah perkotaan, mekanisme ini lebih parah karena drainase buatan yang menyediakan koneksi lateral antara pori makro bawah permukaan dan badan air.

Dalam kaitannya dengan bahan organik tanah, topik pencucian P lebih difokuskan pada P-organik, kapasitas penyangga P, dan indeks retensi P dalam kaitannya dengan pencucian C-organik tanah. Kapasitas penyangga P dan indeks retensi P berkorelasi dengan P-organik dalam tanah. Sementara itu, C-organik tanah berkorelasi positif dengan aktivitas fosfatase, terutama pada tanah masam pada penelitian lain. Oleh karena itu, C-organik tanah berperan penting dalam memengaruhi dinamika P pada tanah laterit masam. Jika pencucian C-organik menonjol pada tanah-tanah ini, maka P-organik memengaruhi adsorpsi P. Pencucian mungkin juga berpengaruh pada mobilitas P dalam profil tanah. Hampir 90% dari P-total dalam *leachate* berbentuk P-organik terlarut dan pencuciannya berkorelasi positif dengan C-organik larut dalam *leachate*. Dalam kasus serupa, ada dugaan

bahwa penurunan potensi redoks mungkin bertanggung jawab untuk meningkatkan konsentrasi P dalam larutan serta C-organik terlarut, dan mengintensifkan pencucian keduanya.

Karena adsorpsi dan pelepasan P berhubungan dengan C-organik tanah, sedangkan Al- dan Fe-hidroksida merupakan faktor dalam adsorpsi P, mobilitas C-organik tanah dalam pencucian juga dapat memengaruhi konsentrasi seskuioksida melalui profil tanah. Pada daerah tropis dengan curah hujan tinggi, mekanisme ini dapat mencuci P ke profil tanah laterit yang lebih dalam.

8 ISU KEKINIAN DALAM BAHAN ORGANIK TANAH

Bahan organik tanah merupakan aspek penting dari kesehatan dan kesuburan tanah, dan telah menjadi topik penelitian dan diskusi dalam komunitas ilmiah selama bertahun-tahun. Beberapa topik baru berikut ini menarik untuk disimak untuk mengerti lebih jauh peran bahan organik tanah adalah:

8.1 Dampak perubahan iklim pada bahan organik tanah

Para peneliti mengeksplorasi efek perubahan iklim pada bahan organik tanah, termasuk perubahan suhu, curah hujan, dan tingkat CO₂. Perubahan iklim berdampak signifikan terhadap bahan organik tanah, yang sangat penting bagi kesehatan tanah dan sekuestrasi C. Berikut adalah beberapa efek utama:

- Sekuestrasi C. Bahan organik tanah memainkan peran penting dalam menangkap C dari atmosfer. Namun, perubahan iklim dapat mengganggu keseimbangan ini, menyebabkan berkurangnya C yang tersimpan di dalam tanah.
- Fungsi tanah. Perubahan iklim, khususnya perubahan pola curah hujan, dapat mempengaruhi fungsi pengaturan air tanah. Hal ini dapat menyebabkan masalah seperti kekurangan pangan, banjir, dan erosi tanah jika tanah tidak dapat mengelola air secara efektif.
- Aktivitas mikroba. Pemanasan suhu dapat meningkatkan aktivitas mikroba, yang pada gilirannya dapat mempercepat penguraian bahan organik. Proses ini melepaskan lebih banyak CO₂ ke atmosfer, menciptakan umpan balik positif yang memperburuk perubahan iklim.
- Erosi tanah. Cuaca ekstrem, yang semakin sering terjadi akibat perubahan iklim, dapat menyebabkan peningkatan

erosi tanah. Hal ini tidak hanya mengurangi jumlah SOM tetapi juga mempengaruhi kemampuan tanah dalam mendukung pertumbuhan tanaman.

- Sekresi akar. Perubahan iklim dapat meningkatkan sekresi senyawa organik oleh akar ke dalam tanah, yang berpotensi menyebabkan hilangnya C tanah.

Secara keseluruhan, perubahan iklim diperkirakan akan menyebabkan penurunan cadangan C tanah, yang merupakan bagian dari kesehatan tanah dan siklus C global.

8.2 Bahan organik dan kesehatan tanah

Peran bahan organik tanah dalam mempromosikan kesehatan tanah semakin meningkat. Bahan organik memiliki peran penting dalam menentukan kesehatan tanah dan kemampuannya untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Beberapa aspek penting dari hubungan antara bahan organik dan kesehatan tanah adalah:

- Meningkatkan kesuburan tanah. Bahan organik menyediakan nutrisi yang esensial bagi tanaman dan mikroorganisme tanah. Seiring waktu, bahan organik terdekomposisi menjadi bentuk yang lebih sederhana, melepaskan nutrisi seperti N, P, dan K yang dapat diserap oleh tanaman.
- Memperbaiki struktur tanah. Bahan organik membantu membentuk agregat tanah yang stabil, yang meningkatkan porositas dan aerasi tanah. Hal ini memungkinkan akar tanaman untuk tumbuh lebih mudah dan mengakses O₂ serta unsur hara yang dibutuhkan.
- Menyimpan air. Bahan organik dapat menyerap dan menyimpan air dan sangat penting dalam kondisi kekeringan. Kondisi ini membantu tanaman tetap terhidrasi dan mengurangi kebutuhan irigasi.

- Mendukung kehidupan mikroba. Bahan organik adalah sumber makanan bagi mikroorganisme tanah, yang memainkan peran kunci dalam proses-proses seperti dekomposisi, siklus unsur hara, dan pengendalian penyakit.
- Mengurangi erosi. Bahan organik meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi risiko erosi oleh angin dan air.
- Mengurangi polusi. Bahan organik dapat membantu mengikat polutan dan mengurangi risiko pencemaran air dan tanah.

Secara keseluruhan, penambahan bahan organik ke dalam tanah merupakan salah satu cara terbaik untuk memperbaiki dan memelihara kesehatan tanah, yang pada gilirannya mendukung sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan produktif.

8.3 Penyerapan karbon dan bahan organik tanah

Bahan organik tanah merupakan reservoir utama C di dalam tanah. Akhir-akhir ini, tren praktik pengelolaan tanah untuk meningkatkan penyerapan C tanah semakin meningkat. Harus diingat dengan baik adanya hubungan yang signifikan antara sekuestrasi C dan bahan organik tanah. Sekuestrasi C adalah proses penangkapan dan penyimpanan C atmosfer ke dalam tanah menjadi bahan organik. Bahan organik tanah, yang terdiri dari sisa-sisa tanaman dan mikroorganisme yang telah mati dan terdekomposisi, merupakan reservoir penting untuk C yang disekuestrasi.

Ketika bahan organik terdekomposisi, C yang dikandungnya diubah menjadi bentuk yang lebih stabil (humus) yang dapat bertahan di dalam tanah untuk jangka waktu yang lama. Proses ini membantu mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer, yang merupakan gas rumah kaca (GRK) utama yang berkontribusi terhadap pemanasan global.

Pengelolaan tanah yang baik, seperti rotasi tanaman, penggunaan pupuk organik, dan praktik pertanian konservasi, dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan, sebagai

hasilnya, meningkatkan kapasitas tanah untuk menyerap C. Hal ini tidak hanya membantu dalam mitigasi perubahan iklim tetapi juga meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas pertanian.

8.4 Kontribusi mikroba terhadap bahan organik tanah

Bahan organik tanah sebagian besar terdiri dari bahan tumbuhan dan hewan yang mati, tetapi juga dipengaruhi oleh proses mikroba. Para peneliti sudah paham betul akan peran mikroba dalam pembentukan dan dekomposisi bahan organik tanah.

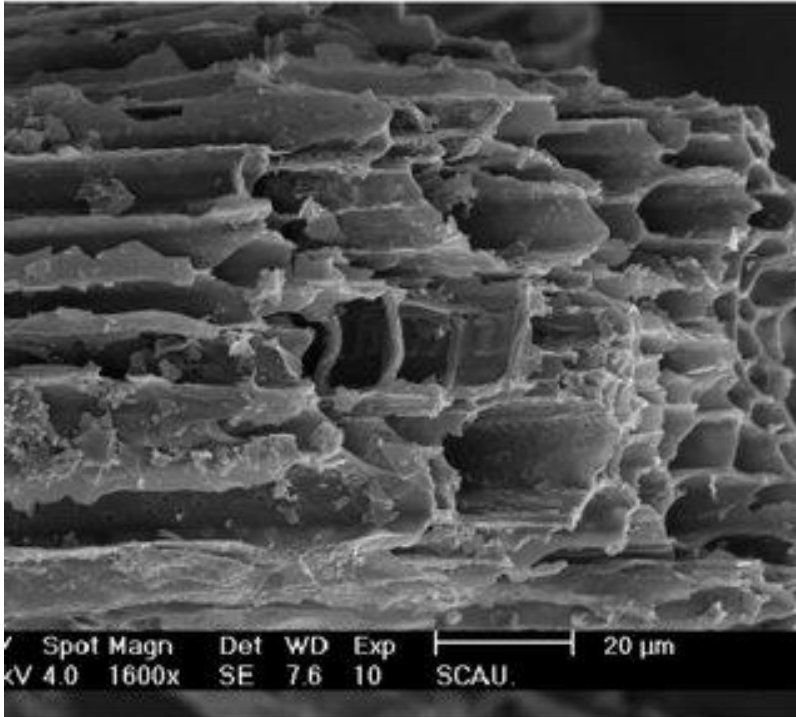
Mikroba tanah memiliki kontribusi yang sangat penting terhadap bahan organik tanah. Berikut adalah beberapa peran utama mikroba dalam hubungannya dengan bahan organik:

- Dekomposisi. Mikroba seperti bakteri dan jamur memecah sisa-sisa tanaman dan hewan, mengubahnya menjadi bentuk yang lebih sederhana yang dapat diserap oleh tanaman.
- Siklus unsur hara. Mikroba berperan dalam siklus hara seperti N, P, dan S, yang penting untuk kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman.
- Struktur tanah. Aktivitas mikroba membantu membentuk agregat tanah yang meningkatkan porositas dan aerasi tanah, yang penting untuk pertumbuhan akar tanaman.
- Kesehatan tanah. Mikroba dapat meningkatkan kesehatan tanah dengan mengendalikan patogen tanah dan mendegradasi polutan.
- *Biofertilizer*. Beberapa mikroba digunakan dalam pembuatan pupuk hayati yang meningkatkan ketersediaan hara dalam tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman.

Secara keseluruhan, mikroba tanah memainkan peran kunci dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah dan mendukung produktivitas pertanian.

8.5 Arangbio dan bahan organik tanah

Biochar adalah bentuk arang yang dihasilkan dengan memanaskan bahan organik tanpa adanya O₂. Telah diusulkan sebagai amandemen tanah untuk meningkatkan bahan organik tanah dan meningkatkan kesuburan tanah.



Gambar 20. *Scanning Electron Microscope* dari arangbio jerami gandum. Sumber: Lu et al., 2016.

Melihat Gambar 12 di atas maka bisa dimengerti kenapa arangbio dan bahan organik mempunyai kapasitas tukar kation yang tinggi. Struktur seperti rangka sel di atas menjadi dasar kenapa arangbio dan bahan organik luas permukaan yang besar yang mampu menciptakan muatan yang besar pula pada tanah yang mengandungnya.

Secara keseluruhan, ada pemahaman yang berkembang tentang pentingnya bahan organik tanah untuk kesehatan tanah dan fungsi ekosistem, dan penelitian yang sedang berlangsung mencari cara untuk mengelola dan melindungi sumber daya vital ini dengan lebih baik.

8.6 Topik penelitian terbaru

Tidak semua bahan organik mendatangkan manfaat besar bagi tanah. Akhir-akhir ini bermunculan bahan organik yang justru bersifat polutan bagi tanah itu sendiri. Berbagai istilah muncul bersamaan dengan makin banyaknya ditemukan bahan kimia yang digunakan dalam pertanian intensif.

Riset kekinian tentang bahan organik tanah adalah penelitian yang berhubungan dengan kehadiran, migrasi, dan degradasi polutan organik baru dalam lingkungan tanah. Polutan organik baru (EPs = *Emerging pollutants*) merujuk pada kontaminan yang berasal dari aktivitas manusia dan hadir tetapi tidak tunduk pada tindakan regulasi, sehingga menimbulkan risiko bagi kehidupan dan lingkungan ekologi. Tanah berperan sebagai jembatan penting yang menghubungkan sungai daratan dan perairan laut, serta sebagai jalur signifikan bagi polutan daratan untuk memasuki laut.

Ketika polutan organik baru ini memasuki lingkungan estuari, mereka mengalami perubahan drastis dalam kondisi hidrokimia seperti pH, salinitas, materi organik terlarut, dan potensial redoks. Akibatnya, mereka mengalami berbagai proses kimia termasuk koagulasi, presipitasi, adsorpsi, dan desorpsi. Proses-proses ini secara signifikan memengaruhi migrasi dan transformasi polutan organik ini di dalam estuari, serta aliran transportasi mereka menuju laut dan risiko ekologis yang terkait.

Ada pula istilah lain yang kurang lebih sama dengan EPs di atas, yaitu *Persistent Organic Pollutants* (POPs). POPs didefinisikan sebagai sekelompok bahan kimia yang memiliki karakteristik khusus:

- Persisten: Artinya, mereka tetap berada di lingkungan dan dalam tubuh makhluk hidup untuk waktu yang lama.
- Organik: Mereka dapat memasuki dan mempengaruhi semua makhluk hidup.
- Berbahaya: POPs berdampak negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia.

Beberapa jenis POPs yang umum meliputi:

- Dioksin: Dioksin adalah salah satu POPs yang paling beracun. Dioksin dilepaskan dari pembakaran plastik PVC, pemutihan kertas, batu bara, dan bahan-bahan lain yang mengandung klorin. Dioksin dapat ditemukan di dalam makanan dan minuman kita dan menyebabkan kanker.
- PCBs (*Poly Chlorinated Biphenyls*): Dulu, PCBs digunakan dalam pembuatan peralatan listrik seperti transformator dan saklar, serta dalam produk seperti kertas fotokopi tanpa C. PCBs juga berbahaya dan dapat ditemukan di sekitar kita.

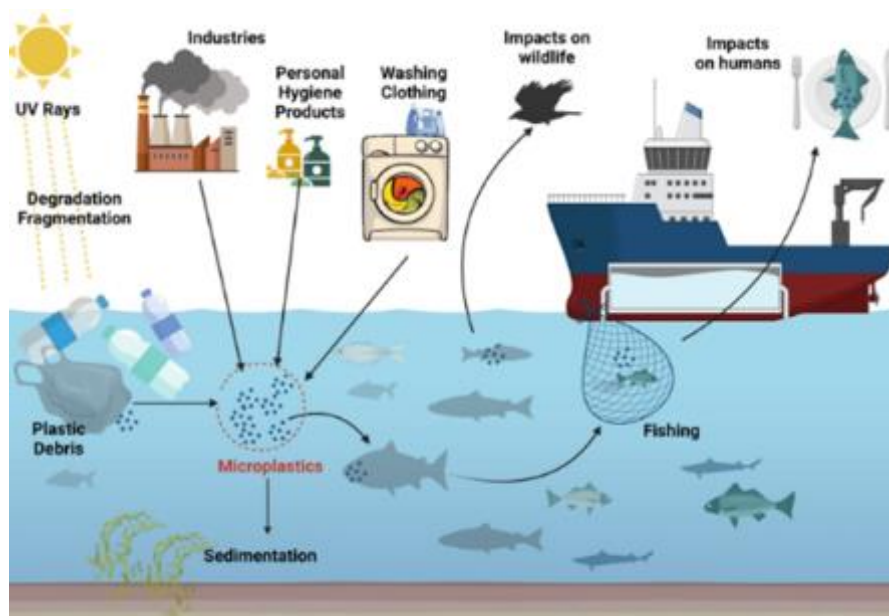
Sekarang ini, sangat penting untuk memahami dan mengurangi paparan terhadap POPs agar kita bisa melindungi lingkungan dan kesehatan kita sendiri.

Seiring senyawa dengan nama polutan yang berbau kimia, muncul pula nama mikroplastik yang sudah menyebar ke segala penjuru komponen ekosistem (Ziani et al., 2023). Mikroplastik adalah potongan plastik yang sangat kecil dan dapat mencemari lingkungan. Meskipun ada berbagai pendapat mengenai ukurannya, mikroplastik didefinisikan memiliki diameter yang kurang dari 5 mm. Terdapat dua jenis mikroplastik:

- Mikroplastik primer. Polutan ini diproduksi untuk bahan tertentu yang langsung dipakai manusia, seperti sabun, detergen, kosmetik, dan pakaian. Mikroplastik primer memiliki ukuran yang lebih kecil dan berasal dari produk konsumsi sehari-hari.

- Mikroplastik sekunder. Berasal dari penguraian sampah plastik di lautan yang terbentuk ketika plastik makro mengalami degradasi menjadi fragmen yang lebih kecil.

Mikroplastik dapat ditelan oleh makhluk hidup yang sangat kecil seperti bakteri, amoeba, dan plankton yang hidup di perairan. Akhirnya, mikroplastik ini dimakan oleh ikan atau hewan air lainnya, sehingga akan mengalami penimbunan di dalam tubuh hewan pemangsa tersebut. Selain itu, mikroplastik juga dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui makanan, misalnya mengonsumsi ikan atau hewan air yang tercemar limbah plastik, serta penggunaan garam saat pengawetan ikan dan wadah makanan yang terbuat dari plastik.



Gambar 21. Sebaran polutan mikroplastik di lingkungan kita. Sumber: Ziani et al., 2023.

Sebagaimana halnya dengan senyawa polutan sebelumnya, sangat lah penting untuk memahami dampak mikroplastik bagi kesehatan dan lingkungan serta mengurangi penggunaan plastik agar melindungi ekosistem kita.

Ada beberapa polutan organik yang sangat berbahaya bagi manusia, antara lain adalah:

- *Dichloro diphenyl trichloroethane* (DDT), adalah insektisida yang pernah banyak digunakan. Meskipun penggunaannya telah dilarang di banyak negara, dampaknya masih terasa karena DDT sangat persisten dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan.
- *Aldrin, Endrin, dan Dieldrin*. Ketiganya adalah insektisida organoklorin yang memiliki efek toksik pada sistem saraf pusat dan dapat menyebabkan kanker.
- *Chlordane* dan *Heptachlor*: Keduanya digunakan sebagai pestisida tanah dan memiliki efek berbahaya pada kesehatan manusia.
- *Mirex* dan *Toxaphene*: Digunakan sebagai bahan pemadam api dan pestisida, keduanya memiliki dampak negatif pada sistem reproduksi dan kesehatan manusia.
- *Poly Chlorinated Biphenyl* (PCB): PCB adalah bahan kimia industri yang digunakan dalam transformator dan peralatan listrik lainnya. PCB sangat persisten, bioakumulatif, dan beracun bagi manusia.

Ingatlah bahwa senyawa-senyawa ini harus diperlakukan dengan hati-hati dan langkah-langkah harus diambil untuk mengurangi paparan terhadap mereka.

Bahan organik dianggap sebagai faktor paling penting yang membatasi ketersediaan dan mobilitas POPs di dalam tanah dan sebagian besar dari jumlah total kontaminan organik yang diterapkan pada tanah dapat dikaitkan dengan fraksi humik tanah tersebut. Polutan organik sangat terjerap pada *sorbent* (penjerap) dengan kandungan C yang tinggi C-aktif (arang aktif). Secara khusus, arang aktif dikenal memiliki kapasitas adsorpsi yang kuat karena luas permukaan spesifiknya yang sangat tinggi. Adsorpsi pada arang aktif dapat menyebabkan polutan organik kurang tersedia bagi organisme dan menghambat penyebarannya ke

komponen lingkungan. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa beberapa penjerap dari bahan organik alami, seperti gambut, batang kedelai, dan daun pinus dapat menyerap hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) di tanah yang terkontaminasi (Hayat et al., 2010).

9 BUTIR SIMPULAN

9.1 Garis Besar

Banyak literatur penelitian tentang bahan organik tanah yang ada saat ini, terutama mengenai pentingnya bahan organik tanah bagi sifat-sifat tanah. Selama 50 tahun terakhir, kemajuan yang mengesankan telah dicapai pada kimia C dan N dalam bahan organik tanah. Namun penelitian tentang bahan organik tanah dalam hubungannya dengan P dan unsur-unsur lain yang terdapat dalam komponen bahan organik tanah masih kurang, terutama pada negara-negara yang kurang penelitian tentang tanah.

C-organik sekarang dianggap sebagai isu global. Minat dalam menentukan stok C-organik tanah pada skala global, benua, dan regional telah meningkat dengan kemajuan pengetahuan tentang perubahan iklim. Kekhawatiran abad ke-21 yang meliputi:

- masalah ketahanan pangan akibat kelebihan populasi di beberapa bagian dunia, dan
- kontribusi antropogenik terhadap gas rumah kaca juga mengarah pada pertimbangan peran bahan organik tanah dalam kualitas dan pertanian berkelanjutan.

Oleh karena itu, identifikasi solusi harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti pengurangan kehilangan C dan pembuatan serta penguatan serapan C. Ini termasuk pengelolaan stok C (organik dan anorganik) di tanah pertanian dan lahan terdegradasi, dan upaya untuk merehabilitasi tanah marjinal sehingga kembali ke ekosistem alami.

Keterbatasan informasi tentang P-organik dalam tanah, terutama pada tanah laterit seperti Ultisols dan Oxisols, menghambat pengelolaan yang efektif dari tanah-tanah tersebut. Karena ketahanan pangan untuk negara-negara berkembang sangat penting, dan pengembangan atau reklamasi lahan marjinal

menjadi alternatif yang paling memungkinkan, pengetahuan tentang P-organik tanah sangat diperlukan. Di lingkungan dengan status P rendah seperti tanah laterit, P-organik tanah menyumbang hingga 80% dari P-total tanah, terutama di daerah tropis di mana pupuk P tidak begitu digunakan secara luas.

Penerapan berbagai jenis bahan organik merupakan strategi penting untuk mengelola Oxisols dalam sistem pertanian. Namun, persistensi bahan organik yang baru ditambahkan atau sejauh mana penambahan bahan organik memiliki keuntungan dalam menjaga penyimpanan C tanah dalam jangka panjang tidak sepenuhnya dipahami pada tanah-tanah tersebut. Selain itu, sumber dan kadar bahan organik yang tepat untuk Oxisols di Australia Barat dalam kaitannya dengan persistensi C-organik tanah, dan ketersediaan N dan P belum dipelajari. Untuk menentukan jenis bahan organik yang akan digunakan, penting untuk mengetahui bagaimana dan mengapa berbagai sumber bahan organik berbeda dalam mineralisasi dan persistensi C dan N.

P-tersedia (diukur dengan ekstraksi bikarbonat pada pH 8,5) biasanya hanya ada dalam jumlah yang sangat kecil di tanah Ultisols dan Oxisols, sebagian karena adsorpsinya oleh Al dan Fe-oksida dan kaolinit atau karena presipitasinya sebagai Al- dan Fe-P. Konsentrasi P-organik bisa mencapai lebih dari 50% dari P-total karena P-monoester bermuatan tinggi memungkinkan adsorpsi cepat pada tanah. mineral dan interaksi ekstensif dengan seskuioksida yang melindungi P-inositol dari degradasi. Oleh karena itu, setiap mekanisme yang dapat memastikan kelangsungan transformasi P-organik menjadi P-anorganik setelah penambahan bahan organik segar mungkin penting dalam tanah laterit. Selain itu, aktivitas fosfatase telah terbukti berkorelasi positif dengan C-organik tanah, terutama pada tanah masam. Semua proses ini perlu dikaji untuk menentukan mekanisme transformasi P ketika berbagai sumber bahan organik ditambahkan ke tanah laterit.

Adsorpsi P, diukur dengan kapasitas penyangga P dan indeks retensi P, berkorelasi dengan P-organik dalam tanah. C-organik

tanah berkorelasi positif dengan aktivitas fosfatase, terutama pada tanah masam. Dengan demikian, C-organik tanah berperan penting dalam transformasi P pada tanah laterit masam. Jika pencucian C-organik intensif pada tanah-tanah tersebut, dan C-organik mempengaruhi adsorpsi P, pencucian ini juga akan berpengaruh pada mobilitas P dalam profil tanah. Untuk tanah di daerah tropis, keseimbangan antara arah atas (respirasi) dan bawah (organik terlarut)

9.2 Kesimpulan

Tidak ada faktor yang lebih penting yang berkaitan dengan kesuburan dan produktivitas tanah jangka panjang selain bahan organik tanah. Dengan demikian, mempertahankan atau meningkatkan bahan organik tanah secara tidak langsung akan meningkatkan prospek ketahanan pangan dunia, apalagi masalah overpopulasi masih membayangi. Hal ini biasanya diatasi dengan mengembangkan atau mereklamasi tanah laterit marjinal seperti Ultisols dan Oxisols.

Penambahan bahan organik dapat menjadi solusi untuk pengelolaan dinamika dan pasokan hara tanah. Namun, sumber yang tepat dan kegigihan bahan organik dapat dipertanyakan karena kapasitasnya berkontribusi pada nutrisi tanaman dalam jangka panjang. Gambut, meskipun sifatnya bandel, mungkin tidak cocok karena kandungan unsur hara lain yang minim. Di sisi lain, tanaman polongan yang memiliki kandungan nutrisi tinggi cenderung membusuk dan hilang dengan sangat cepat. Proporsi optimal dari kedua sumber mungkin menjadi solusi untuk sumber nutrisi yang baik dari bahan organik yang dapat bertahan lebih lama di tanah.

Dalam hal penyediaan unsur hara, bahan organik tanah berperan penting dalam dinamika P, terutama pada tanah laterit, di mana persediaan P terbatas karena adsorpsi P yang tinggi. Kemampuan bahan organik tanah untuk meminimalkan adsorpsi P dan pasokan P melalui mineralisasi, dan proporsi P-organik yang

tinggi dalam tanah laterit, mengarah pada gagasan bahwa P dapat dikelola tanpa masukan kimia lainnya. Sifat biokimia tanah seperti aktivitas fosfatase juga dapat berkontribusi untuk meningkatkan kandungan P yang tersedia secara hayati.

Curah hujan yang tinggi pada tanah laterit di daerah tropis menyebabkan hilangnya bahan organik tanah dalam bentuk lain. Kehilangan permukaan berupa erosi tanah, sedikit banyak, dapat dikelola dengan tanaman penutup tanah dan mulsa. Namun kehilangan C akibat pencucian atau bahan organik terlarut masih memerlukan penelitian, terutama mengenai pergerakannya ke bawah profil tanah. Selain itu, C-organik terlarut dapat mempengaruhi sifat-sifat tanah lainnya seperti status P dan mobilitas Al dan Fe.

Solusi alternatif perlu dicari untuk mengelola status dan transformasi P, terutama di negara-negara di mana peningkatan populasi harus diimbangi dengan peningkatan produksi pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. (2024, April 11). *Terra Preta A Perspective on Terra Preta and Biochar*.
- Dubus, I. G., & Becquer, T. (2001). Phosphorus sorption and desorption in oxide-rich Ferralsols of New Caledonia. *Australian Journal of Soil Research*, 39(2). <https://doi.org/10.1071/SR00003>
- Hartemink, A. E., & Barrow, N. J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. In *Plant and Soil* (Vol. 486, Issues 1–2). <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Hayat, M. T., Xu, J., Ding, N., & Mahmood, T. (2010). Dynamic Behavior of Persistent Organic Pollutants in Soil and Their Interaction with Organic Matter. In *Molecular Environmental Soil Science at the Interfaces in the Earth's Critical Zone*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05297-2_65
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237(2). <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Lu, Y., Rao, S., Huang, F., Cai, Y., Wang, G., & Cai, K. (2016). Effects of Biochar Amendment on Tomato Bacterial Wilt Resistance and Soil Microbial Amount and Activity. *International Journal of Agronomy*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/2938282>
- Marinari, S., Masciandaro, G., Ceccanti, B., & Grego, S. (2000). Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological

- and physical properties. *Bioresource Technology*, 72(1). [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00094-2)
- myloview. (2024, April 3). *Global warming climate change infographics*.
- National Ocean Services. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2024, March 16). *What is coral bleaching?*
- Nyle C. Brady, R. R. W. (2017). *The Nature and Properties of Soils*, 15th edition, ISBN 978-0-13-325448-8. In *Pearson Education*.
- Riebeek, H. (2011). *The Carbon Cycle: Feature Articles*. In *NASA Earth Observatory*.
- Sellers, P.J., Meeson, B.W., Hall, F.G., Asrar, G., Murphy, R.E., Schiffer, R.A., F.P., B., Dickinson, R.E., Ellingson, R.G., Field, C.B., ... P.D. (1995). *Remote Sensing of the Land Surface for Studies of Global Change: Models Algorithms Experiments. Remote Sensing of Environment*.
- Yusran, F. H. (2005). *Soil organic matter decomposition: Effect of organic matter addition on P dynamics in lateritic soils*. The University of Western Australia.
- Yusran, F. H., Hadi, A., Budi, I. S., Salamiah, & Wahdah, R. (2021). *Karbon Organik Tanah: Konsentrasi Kecil Manfaat Besar yang Terabaikan*. In S. Hadi (Ed.), *Aplikasi Teknologi yang Selaras dengan Karakter Lahan Basah* (pp. 222–245). ULM Press.
- Zhang, H. L., Fang, W., Wang, Y. P., Sheng, G. P., Zeng, R. J., Li, W. W., & Yu, H. Q. (2013). Phosphorus removal in an enhanced biological phosphorus removal process: Roles of extracellular polymeric substances. *Environmental Science and Technology*, 47(20). <https://doi.org/10.1021/es403227p>

Ziani, K., Ioniță-Mîndrican, C. B., Mititelu, M., Neacșu, S. M., Negrei, C., Moroșan, E., Drăgănescu, D., & Preda, O. T. (2023). Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. In *Nutrients* (Vol. 15, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/nu15030617>

GLOSARIUM

| | |
|---------------------------|--|
| Agroforestri | Strategi baru pemanfaatan hutan alami untuk menyokong kebutuhan manusia yang terus bertambah. Gabungan pohon dan tanaman pertanian untuk memperbaiki struktur tanah dan siklus unsur hara. |
| Amendemen tanah | Jenis input (kompos, pupuk kandang, pupuk hijau, kapur, mulsa, arangbio, dan penutup tanah) yang diberikan ke tanah dengan tujuan untuk memperbaiki kondisi tanah. |
| <i>Biofertilizers</i> | Pemanfaatan mikroba tanah (inheren maupun introduksi) untuk meningkatkan penyerapan unsur hara dengan membentuk hubungan simbiotik antara mikroorganisme tanah dengan akar tanaman. |
| BOT (SOM) | Bahan organik tanah atau <i>soil organic matter</i> adalah hasil dekomposisi dari sisa tumbuhan dan hewan mati yang sudah mengalami proses dekomposisi biokimia |
| <i>Coral bleaching</i> | Hilangnya warna dari karang laut karena stres akibat naiknya suhu laut atau terjadinya polusi pada ekosistem. |
| <i>C-trade</i> | Disebut juga sebagai perdagangan C |
| Dekomposisi bahan organik | Terurainya bahan organik karena bantuan mikroorganisme tanah. Bisa juga disebut proses mineralisasi. |

| | |
|-------------------------------|---|
| Disolusi dan presipitasi | Proses pelepasan unsur hara dari keadaan terikat dengan sesuatu menjadi terlarut ke dalam larutan tanah. Presipitasi sendiri merupakan kebalikan dari disolusi. Biasanya adalah proses bergabungnya unsur hara dengan senyawa lain sehingga menjadi tidak tersedia bagi tumbuhan (mengendap). |
| Emisi C | Lepasnya C dari permukaan tanah melalui siklus C cepat ke atmosfer yang mengakibatkan terjadinya perubahan iklim dan pemanasan global. |
| Fosfatase | Enzim yang diproduksi oleh akar tanaman dan mikroorganisme pada saat lingkungan mereka kekurangan unsur hara P. |
| Fraksi aktif (segar) | Fraksi aktif bahan organik tanah yang paling berperan terhadap perubahan sifat tanah (fisik, kimia, dan biologi). |
| Lahan laterit dan sub optimal | Biasanya dikenal dengan lahan kritis (lahan kering) dengan jenis tanah Ultisols dan Oxisols. Biasa juga disebut sebagai lahan Podsolik Merah Kuning. |
| Mikroplastik | Produk plastik yang berukuran 5 mm sampai berukuran μm . Ada yang primer atau berasal dari produk yang dimanfaatkan langsung oleh manusia seperti sabun, detergen, kosmetik, dan pakaian. Sementara, mikroplastik sekunder berasal dari penguraian sampah plastik. |

| | |
|---|--|
| Mineralisasi unsur hara | Proses penguraian bahan organik menjadi senyawa anorganik (unsur hara) setelah dekomposisinya berlangsung sempurna |
| Organisme pengakumulasi P | PAO = <i>Polyphosphorus Accumulating Organisms</i> adalah organisme yang mampu mengumpulkan unsur hara P di dalam tubuhnya lewat proses metabolisme. |
| Pemanasan global (<i>global warming</i>) atau perubahan iklim | Akibat yang muncul karena pesatnya pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi. Sementara, mekanisme sekuestrasi hanya bergantung pada fotosintesis. |
| Persistensi bahan organik | Daya tahan bahan organik dari proses penguraian mikroorganisme. Gambut dianggap sebagai contoh bahan organik dengan persistensi tinggi |
| <i>Priming effect</i> | Peningkatan atau penurunan laju dekomposisi bahan organik tanah setelah penambahan bahan organik segar. Biasanya dikaitkan dengan aktivitas mikroba karena ketersediaan energi tambahan, namun faktor lain seperti stabilitas bahan organik tanah, komposisi komunitas mikroba, dan kondisi lingkungan juga berpengaruh. |
| Pertukaran ligan | Adalah proses pertukaran muatan yang terjadi antara senyawa anion organik (ligan) yang berasal dari tumbuhan (di- dan tri-karboksilat seperti asam oksalat, oksaloasetat, malat, fumarat, dan suksinat) yang |

membuat unsur hara P menjadi lebih tersedia.

- Pencucian P Kondisi tercucinya unsur hara P yang bermuatan negatif menjadi mobil dan tidak terjerap di permukaan koloid liat yang juga bermuatan negatif.
- Sekuestrasi C Proses lawan dari emisi C. Proses ini hanya bisa dilakukan melalui fotosintesis tumbuhan hijau yang mempunyai klorofil.
- Siklus C Siklus C cepat, siklus C yang merujuk pada perputaran C di dalam ekosistem yang terjadi secara cepat melalui proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah. Siklus C lambat, siklus yang melewati waktu 100-200 juta tahun dan bergerak di antara batuan, tanah, lautan, dan atmosfer
- Sorpsi dan desorpsi Istilah yang digunakan untuk menggambarkan akumulasi satu unsur pada permukaan partikel tanah yang bisa pula dibarengi dengan penetrasi ke dalam adsorben, sehingga mengakibatkan adsorpsi lanjutan. Kedua proses (sorpsi-desorpsi) terjadi secara simultan.
- TOT (*zero tillage*) Tanpa Olah Tanah adalah pengolahan tanah minimum atau bahkan tanpa pengolahan untuk menghindari hancurnya sifat fisik tanah (struktur, agregat, dan konsistensi).

Terra Preta

Disebut juga sebagai *Amazonian Dark Earth*, adalah tanah yang kaya unsur hara berasal dari kearifan lokal Indian Amazon sejak ribuan tahun yang lalu. Amendemen organik yang dilakukan mereka malah mewariskan kekayaan alam kepada generasi sekarang di sana.

Unsur hara

Disebut juga nutrisi tumbuhan. Unsur hara dibagi menjadi hara makro (N, P, dan K) serta hara mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, dan Cl).

INDEKS

A

Agroforestri, 37
aliran preferensial, 64
Amazonian Dark Earth, 41
antropogenik, 25
Arang dan karbon hitam, 28

B

Bahan organik aktif, 22
Bahan organik partikulat, 28
Biochar, 41
Biofertilizer, 37
Biofertilizer., 70
Biomassa mikroba, 28

C

C stock, 25
carbon trade, 5
Chlordane, 75
contour planting, 36
Coral bleaching, 16

D

Deposisi N, 32
Dichloro diphenyl trichloroethane, 75
Disolusi, 55
DNA, 9

E

Emerging pollutants, 72
Endrin, 75
Erosi tanah, 31

F

Fitoplankton, 11
fosfatase, 61
Fosfor
 Fosfor biomassa mikroba, 59

 Fosfor organik, 58
fotosintesis, 10
Fraksi non-humat, 28
fullerene, 6

G

Gambut, 25, 40
gas rumah kaca, 69
global warming, 4, 14
graphe, 6
graphene, 6

H

Heptachlor, 75
histeresis isothermal, 57

K

kalsifikasi, 12
kapur, 35
kesehatan tanah, 68
klatrat, 7
kovalen, 6

L

laterit, 33
leachate, 65
Legume Cover Crop, 34
ligan, 63

M

Mirex, 75
mulsa, 34

N

nisbah C/N, 22
nukleasi, 57

O

organic matter, 1
Oxisols, 33

P

Pemanasan Global, 14
Penggembalaan berlebih, 32
Persistent Organic Pollutants (POPs),
72
perubahan iklim, 67
Podsolik Merah Kuning, 57
Poly Chlorinated Biphenyl, 75
Polyphosphorus Accumulating
Organisms, 59
Priming effect, 51
proses hancuran iklim, 12
pukan, 41

R

recalcitrant, 21

run off, 44

S

senyawa terner, 62
siklus bahan organik, 2
Siklus Cepat, 8
Siklus Lambat, 12
soil test kit, 38
sorpsi, 56

T

tanpa olah tanah, 1
Terra Preta, 41
tetraalen, 6
Toxaphene, 75

U

Ultisols, 33
zero tillage, 37

PROFIL PENULIS



Fadly Hairannoor Yusran, lahir di Amuntai Kalimantan Selatan pada tanggal 21 Desember 1961 dari seorang ayah (almarhum Ahmad Yusran) pegawai negeri sipil dan ibu rumah tangga (Hj. Siti Nurhayati). Sejak lahir hingga tamat sekolah menengah penulis menghabiskan waktunya di tanah kelahiran, sehingga paham betul dengan lingkungan lahan basah dan pesisir sungai. Dari SD (SDN Pancasila Amuntai), SMP (SMPN I Amuntai), sampai SMA (SMA Negeri I Amuntai) penulis menghabiskan waktu belajar bersama saudara dan keluarga besar saja.

Barulah setelah melanjutkan pendidikan S1 (Insinyur) di Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat penulis mulai membuka wawasan tentang keadaan alam Kalimantan dan membandingkannya dengan bagian dunia yang lain. Apalagi setelah penulis berkesempatan mengunjungi negara-negara ASEAN (Filipina, Malaysia, Brunei Darussalam, Singapura, dan Thailand) dan Jepang dalam kegiatan pertukaran pemuda *Ship for Southeast Asian Youth Program*. Demikian pula pada masa studi lanjut S2 (M.Sc.) di *McGill University, Montreal, Canada*, dan S3 (Ph.D.) di *The University of Western Australia, Perth*. Kegiatan seminar, pelatihan, dan kunjungan kerja di Inggris, Jerman, Belanda, Perancis, Italia, Belgia, China, Türkiye, Arab Saudi, Mesir, Palestina, dan Yordania semakin menambah pengetahuan penulis tentang tanah dan segala aspeknya. Pengalaman itu membuat penulis senang berbagi ilmu pengetahuan kepada mahasiswanya,

baik S1, S2, dan S3. Penulis sekarang aktif mengajar dan menulis sebagai guru besar di Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat.

Penulis membina rumah-tangga dengan Nuri Dewi Yanti, seorang dosen, dan dikaruniai seorang putri (Windi Bunga Devita), yang juga seorang dosen, dan seorang putra (Muhammad Hari Diputera) yang bekerja di PT Telkom Indonesia. Sekarang penulis sudah menjadi kakek dari seorang cucu yang bernama Ibarahim Alhazen Rasyid.

Alamat kantor:

Fakultas Pertanian, Universitas Lambung Mangkurat
Jln. A. Yani KM 36, Simpang Empat, Banjarbaru 70714
Telp/fax (0511) 477 2254

Alamat rumah:

Jln. Otek 44, Kompleks Cahaya Ratu Elok
Banjarbaru 70714

e-mail: fhyusran@ulm.ac.id