



ILMU TANAH



Ria Megasari
Indra Permana
Amin Mbusango
Muhammad Fahyu Sanjaya
Edy Syafril Hayat
Ishak Musaad

ILMU TANAH

**Ria Megasari
Indra Permana
Amin Mbusango
Muhammad Fahyu Sanjaya
Edy Syafril Hayat
Ishak Musaad**



GET PRESS INDONESIA

ILMU TANAH

Penulis : Ria Megasari
Indra Permana
Amin Mbusango
Muhammad Fahyu Sanjaya
Edy Syafril Hayat
Ishak Musaad

ISBN : 978-623-125-350-7

Editor : Mila Sari, M.Si.

Penyunting: Yuliatrini Novita, M.Hum.

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd.

Penerbit: GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi:

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah, Padang, Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Dengan penuh syukur kami persembahkan buku Ilmu Tanah ini sebagai hasil dari dedikasi dan kerja keras tim penyusun. Buku ini dirancang untuk memberikan wawasan mendalam mengenai berbagai aspek ilmu tanah, yang meliputi bahan penyusun tanah, peranan air dan udara, serta organisme dan bahan organik. Setiap bab disusun secara sistematis untuk memudahkan pemahaman tentang komponen dasar tanah, siklus unsur hara, dan faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan tanah. Diharapkan, buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi di bidang pertanian serta lingkungan.

Kami menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini. Semoga buku Ilmu Tanah ini tidak hanya meningkatkan pengetahuan pembaca tentang struktur dan fungsi tanah, tetapi juga mendorong pengembangan ilmu dan praktik yang berkelanjutan dalam pengelolaan tanah dan pertanian. Semoga buku ini menjadi sumber inspirasi dan alat bantu yang efektif untuk memahami kompleksitas dan pentingnya tanah dalam kehidupan sehari-hari.

Padang, Juli 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
BAB 1 BAHAN-BAHAN PENYUSUN TANAH: BAHAN MINERAL DAN ORGANIK	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Bahan Mineral	2
1.3 Bahan Organik.....	7
BAB 2 BAHAN-BAHAN PENYUSUN TANAH: AIR DAN UDARA	15
2.1 Pendahuluan	15
2.2 Air (Larutan Tanah)	18
2.3 Udara Tanah.....	21
2.4 Hubungan Sifat Fisik Tanah dan Komposisi Air dan Udara	26
DAFTAR PUSTAKA.....	27
BAB 3 ORGANISME DAN BAHAN ORGANIK	29
3.1 Pendahuluan	29
3.2 Organisme Tanah.....	31
3.3 Peran Organisme Tanah terhadap Kesuburan Tanah	38
3.3 Bahan Organik Tanah.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	43
BAB 4 SIKLUS UNSUR HARA	49
4.1 Pendahuluan	49
4.2 Siklus Karbon.....	51
4.3 Siklus Nitrogen.....	57
4.4 Siklus Posfat	63

DAFTAR PUSTAKA	69
BAB 5 PERANAN AIR TANAH.....	87
5.1 Pendahuluan	87
5.2 Hubungan Air, Tanah dan Tanaman.....	88
5.3 Proses Terbentuknya Air Tanah	90
5.4 Ketersediaan Air di dalam Tanah	92
5.5 Peranan Air Bagi Tanaman	94
5.6 Mekanisme Masuknya Air ke Akar.....	102
5.7 Transportasi Air dalam Jaringan Tanaman	102
5.8 Pemanfaatan dan Pelestarian Sumber Air Pertanian	103
DAFTAR PUSTAKA	109
BAB 6 FAKTOR-FAKTOR PEMBENTUKAN TANAH.....	123
6.1 Iklim	125
6.2 Bahan Induk.....	126
6.3 Organisme.....	134
6.4 Topografi.....	136
6.5 Waktu.....	137
DAFTAR PUSTAKA	142
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Perbandingan Ukuran relatif antara pasir, debu dan liat fraksi tanah halus	5
Gambar 1. 2. Sifat umum bahan organik tanah (BOT) dan pengaruhnya terhadap sifat – sifat tanah	9
Gambar 2. 1. Ilustrasi persentase komponen penyusun tanah.....	16
Gambar 2. 2. Komposisi air dan udara pada dua kondisi berbeda.....	17
Gambar 2. 3. Penyerapan unsur hara dari larutan tanah melalui akar	20
Gambar 2. 4. Gambaran tentang pori-pori tanah	23
Gambar 2. 5. Dinamika perubahan komposisi air dan udara di dalam tanah	24
Gambar 3. 1. Asosiasi agregat pada Areal rhizosfer.....	32
Gambar 3. 2. Aktivitas organisme tanah pada Areal rhizosfer.....	40
Gambar 4. 1. Siklus karbon jangka Panjang (Berner, 2004)	54
Gambar 4. 2. Siklus carbon jangka pendek (Berner, 2004).....	56
Gambar 4. 3. Hubungan antara ruang pori tanah berisi air dan aktivitas relatif mikroba terhadap siklus N (Linn & Doran, 1984)	61
Gambar 4. 4. Siklus posfor di alam (McConnell et al., 2020).....	67
Gambar 6. 1. Profil Tanah Inceptisols di Ayamaru, Maybrat Papua Barat Daya	140

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Deskripsi Kelas Pasir, Debu dan Liat.....	4
Tabel 2. 1. Perbedaan konsnetrasi udara pada tanah dan atmosfer	22
Tabel 6. 1. Klasifikasi batuan induk*	130
Tabel 6. 2. Uraian Profil Tanah Inceptisols di Ayamaru, Papua Barat Daya	138

BAB 1

BAHAN-BAHAN PENYUSUN TANAH: BAHAN MINERAL DAN ORGANIK

Oleh Ria Megasari

1.1 Pendahuluan

Tanah berasal dari kata Yunani *pedon*, dalam bahasa latin *soil* berarti *solum*. Tanah merupakan benda alam yang terdapat pada lapisan terluar kulit bumi, yang terbuat dari bahan mineral karena pelapukan batuan dan bahan alam karena dekomposisi sisa-sisa tumbuhan dan makhluk hidup yang merupakan media atau tempat tumbuhnya dengan sifat-sifat tertentu, yang terjadi akibat dari pengaruh kombinasi faktor-faktor iklim, bahan induk, jasad hidup, bentuk wilayah dan lamanya waktu pembentukan (Yuliprianto, 2010). Bahan penyusun tanah tersusun atas empat komponen, yaitu bahan padat organik, bahan padat mineral, udara dan air. Bahan padat organik terdiri dari sisa-sisa atau rombakan jasad hidup yang telah mati, seperti tumbuhan, jasad hidup penghuni tanah, zat humik termasuk akar tumbuhan hidup. Air mengandung berbagai zat terlarut sehingga disebut juga larutan tanah.

Pertumbuhan tanaman sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusun tanah. Komponen media tanam yang baik bagi pertumbuhan tanaman terdiri dari tanah, bahan organik, air dan udara. Komponen utama tanah untuk kehidupan tumbuhan yang optimal terdiri dari 50% ruang pori, 45% bahan mineral

(anorganik) dan 5% bahan organik. Keberhasilan Tanah dengan keadaan tekstur dan struktur yang baik sangat menunjang keberhasilan usaha pertanian, struktur tanah yang dikehendaki tanaman adalah struktur tanah yang gembur dan mempunyai ruang pori yang berisi udara dan air sehingga penyerapan unsur hara dapat berjalan optimal (Mega dan Vanya, 2022). Tanah mempunyai kandungan bahan-bahan tersebut dalam jumlah yang berbeda-beda. Perbedaan inilah yang menyebabkan tanah digolongkan menjadi beberapa jenis tanah.

1.2 Bahan Mineral

Partikel mineral merupakan salah satu komponen yang terkandung didalam tanah. Mineral ini merupakan hasil perombakan bahan-bahan batuan dan juga bahan anorganik yang terdapat di permukaan bumi. Partikel mineral ini terkandung di dalam tanah sebanyak 45%. Dengan jumlah tersebut mineral menjadi komponen atau bahan penyusun tanah dengan porsi terbanyak.

Berasal dari pelapukan batuan yang susunan mineralnya bervariasi tergantung sumber batuan yang melapuk. Mineral merupakan Kumpulan dari kristal-kristal hasil suatu persenyawaan yang mempunyai bentuk tertentu sebagai hasil reaksi antar dua atau lebih unsur-unsur kimia kulit bumi.

Bahan mineral (Anorganik) terdiri dari pecahan batuan, kerikil dan mineral (dari butiran pasir, debu, liat). Bahan mineral yang ada didalam tanah dapat digolongkan beberapa jenis, seperti berikut:

1. Penggolongan mineral atas dasar proses terjadinya; a) **Mineral Primer** adalah mineral yang terbentuk pada saat terbentuknya batuan dari magma; b) **Mineral Sekunder**

adalah mineral yang terbentuk dari mineral primer yang mengalami pelapukan.

2. Penggolongan Mineral atas dasar penyusunnya; a) **Mineral Silikat** adalah mineral yang mengandung senyawa silikat dan; b) **Mineral Non Silikat** adalah mineral yang terbentuk tanpa adanya unsur silikat. Misalnya; oksida, sulfat, sulfida, karbonat, klorida dan Fosfat. Susunannya lebih sederhana dibanding silikat.

Bahan mineral ini terbentuk dari proses pelapukan batuan yang berlangsung dalam waktu yang sangat lama. Batuan yang melapuk pada proses pembentukan tanah akan sangat mudah mempengaruhi jenis tanah yang dihasilkan. Ada banyak jenis mineral yang ditemukan di dalam tanah. Mineral-mineral ini sangat bervariasi dalam ukuran dan komposisi kimianya.

1.2.1 Ukuran Partikel Tanah

Ukuran partikel merupakan sifat penting yang memungkinkan kita membedakan berbagai mineral tanah. Tanah mengandung partikel-partikel yang berkisar dari bongkahan batu yang sangat besar hingga partikel-partikel kecil yang tidak terlihat dengan mata telanjang. Untuk lebih membedakan partikel berdasarkan ukurannya, partikel dipisahkan menjadi dua kategori: fraksi tanah halus dan fraksi tanah kasar.

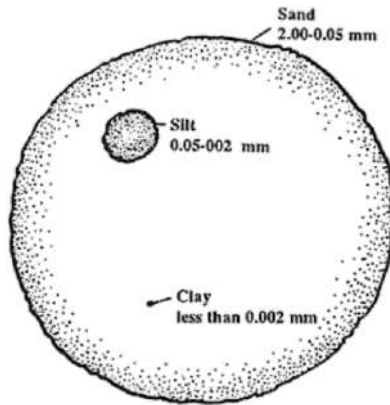
a) Fraksi tanah halus

Fraksi tanah halus mencakup partikel apapun kurang dari 2,0 mm (0,078 inci) dan dibagi menjadi tiga kelas ukuran yaitu; pasir, debu dan liat. Tabel 1 berikut memberikan gambaran masing-masing kelas pada fraksi tanah halus.

Tabel 1. 1. Deskripsi Kelas Pasir, Debu dan Liat

	Ukuran	Tekstur	Karakteristik
Pasir	2,0 mm – 0,05 mm	Berpasir	Pasir terlihat dengan mata telanjang, terdiri dari partikel dengan luas permukaan rendah dan memungkinkan drainase berlebihan
Debu	0,005 mm -0,002 mm	buttery	Debu tidak terlihat dengan mata telanjang dan meningkatkan kapasitas tanah menahan air
Liat	< 0,002 mm	Lengket	Tanah liat memiliki luas permukaan yang tinggi, daya ikat air tinggi, banyak pori-pori kecil dan memiliki permukaan bermuatan untuk menarik dan menahan unsur hara

(Sumber: Soil Nutrient Management for Maui Conty, University of Hawai'i at Manoa)



Gambar 1. 1. Perbandingan Ukuran relatif antara pasir, debu dan liat fraksi tanah halus

(Sumber: Soil Nutrient Management for Maui Conty, University of Hawai'i at Manoa)

b) Fraksi Tanah Kasar

Fraksi kasar tanah mencakup partikel tanah yang ukurannya lebih besar dari 2 mm. Fraksi kasar meliputi bongkahan batu, bebatuan, kerikil dan pasir kasar. Ini merupakan pecahan batuan dan umumnya merupakan kombinasi lebih dari satu jenis mineral.

1.2.2 Pelapukan Mineral Tanah dan Perubahan Komposisi Mineral

Pelapukan adalah proses utama yang mempengaruhi mineral utama bumi untuk membentuk partikel kecil dan halus yang biasa disebut "tanah". Dalam hal pengolahan unsur hara, proses pelapukan sangat mempengaruhi ketersediaan unsur hara tanaman. Awalnya ketika partikel tanah mulai mengalami pelapukan, mineral primer melepaskan unsur hara ke dalam

tanah. Ketika ukuran partikel-partikel ini mengecil tanah juga mampu mempertahankan lebih banyak unsur hara. Namun pada akhirnya, kapasitas untuk menahan dan mempertahankan unsur hara sangat berkurang pada tanah yang mengalami pelapukan tinggi, karena sebagian besar unsur hara telah hilang akibat pencucian.

Ada dua jenis pelapukan; pelapukan fisik dan pelapukan kimia. Perbedaan pola pelapukan menjadi alasan mengapa ukuran partikel tanah sangat beragam. Batu-batu besar lebih sedikit mengalami pelapukan dibandingkan kerikil. Kerikil jauh lebih sedikit mengalami pelapukan dibanding tanah liat. Partikel tanah liat bahkan dapat berubah menjadi bahan lain, seperti besi dan aluminium oksida, yang umumnya tahan terhadap pelapukan lebih lanjut. Di daerah tropis, pelapukan kimia sangat penting. Karena iklim biasanya hangat dan lembab sepanjang tahun, iklim ini menyediakan lingkungan yang cocok untuk terjadinya pelapukan kimia secara terus menerus. Seiring waktu dengan curah hujan yang cukup dan suhu yang hangat, partikel mineral berubah menjadi partikel tanah yang semakin kecil. Akibatnya tanah tropis cenderung merupakan tanah yang sangat mudah mengalami pelapukan.

a) Pelapukan Fisik

Pelapukan fisik adalah proses yang memecah dan menghancurkan batuan induk atau mineral primer di dalam bumi. Di daerah tropis pelapukan fisik disebabkan oleh pembasahan dan pengeringan batuan, erosi, aktivitas tumbuhan dan hewa, atau jatuhnya, pecahnya material batuan menjadi potongan-potongan kecil.

b) Pelapukan Kimia

Pelapukan kimia penting dalam pengelolaan unsur hara karena partikel tanah yang dihasilkan mempertahankan dan memasok unsur hara. Namun, ketika cuaca sangat buruk, tanah kehilangan unsur hara karena pencucian yang berlebihan. Oleh karena itu tanah yang mengalami pelapukan berat cenderung merupakan tanah yang tidak subur, sedangkan tanah yang mengalami pelapukan sedang umumnya lebih subur.

Setelah batuan induk terpecah menjadi potongan-potongan kecil, proses lain akan bekerja pada bantuan tersebut. Proses ini disebut juga pelapukan kimia. Pelapukan kimia melibatkan perubahan atau transformasi, mineral primer menjadi mineral sekunder. Mineral sekunder berfungsi sebagai bahan penyusun dasar partikel-partikel kecil dalam tanah. Akibatnya bahan-bahan baru dapat disintesis, bahan sisa dapat terakumulasi dari bahan-bahan (seperti oksida) yang tidak dapat dilapukkan lebih lanjut atau bahan-bahan dapat hilang akibat pencucian.

1.3 Bahan Organik

Bahan organik tanah (BOT) adalah seluruh fraksi organik dalam tanah yang meliputi sisa-sisa tanaman dan hewan pada berbagai tingkat dekomposisi, sel-sel dan jaringan (biomassa) biota tanah beserta metabolitnya (Gregorich et.al., 2001). Bahan organik tanah merupakan komponen utama untuk memelihara dan meningkatkan keberlanjutan produktivitas tanah karena berpengaruh langsung maupun tidak langsung terhadap sifat fisik, kimia serta biologi tanah (Sanchez, 1989; Karlen et. al.,

1996). Bahan organik tanah juga digunakan sebagai indikator kualitas dan kesehatan tanah karena mempengaruhi kapasitas menahan air, pembentukan agregat, berat volume, pH, kapasitas penyanggaan (buffering), kapasitas tukar kation (KTK), infiltrasi, aerasi, daur hara, mineralisasi, jerapan pestisida, serta keragaman dan aktivitas biota tanah (Swift et al., 1979; Dick and Gregorich, 2004).

1.3.1 Sifat Kimia dan Fisika BO

Produktifitas vegetasi alami dan sistem pertanian intensif pada tanah-tanah masam lebih ditentukan oleh sifat fisiktanah daripada sifat kimianya. Pada tanah-tanah yang sifat fisik tanahnya baik maka kekahatan atau ketidak seimbangan hara dapat segera diatasi dengan pemupukan. Namun, apabila sifat fisik tanahnya buruk maka upaya pemupukan akan kurang efektif. Penambahan bahan organik (BO) akan mempengaruhi secara langsung berbagai sifat fisik tanah. Di daerah tropis seperti di Indonesia, tanah Ultisol (Acrisol) mempunyai sifat fisik yang lebih buruk daripada Oxisols (Ferralsol), sehingga produktivitas Ultisol sangat tergantung pada intensitas pengelolaan BO.

Bahan organik dapat memasok hampir separuh dari jumlah hara N, S dan P yang dibutuhkan tanaman. Hara N dan S dari hasil mineralisasi BO akan terlepas lebih lambat daripada pupuk sintetis sehingga lebih menguntungkan karena tidak mudah hilang lewat pelindian, penguapan dan penyematan. Agar kation hara dalam tanah dapat terhindar dari pelindian, maka KTK efektif tanah harus sekurang-kurangnya sebesar 4 me 100 gram⁻¹ tanah. Bahan organik merupakan bahan pemasok utama KTK pada tanah-tanah masam yang telah mengalami pelapukan lanjut. Tingginya KTK dari BO disebabkan oleh proses ionisasi H

dari gugus karboksil (-COOH), hidroksil (-OH) atau fenolik (-O) yang menghasilkan situs bermuatan negatif.

Efektivitas pengaruh BO terhadap sifat fisika, kimia dan biologi tanah tergantung pada jumlah dan kualitasnya dalam tanah. Bahan organik menyumbang 1/3 dari KTK tanah permukaan dan berperan meningkatkan stabilitas agregat tanah melebihi faktor-faktor lain.

Gambar 1. 2. Sifat umum bahan organik tanah (BOT) dan pengaruhnya terhadap sifat – sifat tanah

Ciri	Sifat	Pengaruh terhadap Tanah
Warna	Warna gelap yang khas dari berbagai jenis tanah adalah disebabkan oleh adanya BO	Memudahkan untuk menyerap panas dari energi surya
Kapasitas menahan air	bO mampu menahan air sebanyak ± 20 kali bobotnya	Mencegah pengeringan dan pengkerutan tanah . meningkatkan daya menahan air
Pelepasan hara (mineralisasi)	Sumber HN_4^+ , NO_3^- , PO_4^- , SO_4^{2-} dan CO_2 yang terdapat dalam ikatan organik (laju dekomposisi BO tanah = $2\text{-}5\%\text{th}^{-1}$).	Memasok unsur hara N P, S secara terkendali (slow rease) bagi akar tanaman dan CO_2 untuk asimilasi C.
Struktur tanah	Bahan perekat (sementasi) antar partikel tanah sehingga membentuk satuan struktur yang disebut agregat tanah.	Memperbaiki aerasi tanah; meningkatkan dan menstabilkan struktur tanah; meningkatkan permeabilitas dan infiltrasi; mengurangi efek pemadatan; menurunkan kohesi dan plastisitas tanah; mengurangi terbentuknya kerak (crust) di permukaan tanah.
Khelasi	Membentuk kompleks stabil dengan CU^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} dan kation polivalen lain.	Meningkatkan ketersediaan unsur hara mikro bagi tanaman
Aktifitas biota	Sumber karbon dan energi	Mendorong perkembangan

Ciri	Sifat	Pengaruh terhadap Tanah
tanah	yang lambat tersedia bagi biota tanah	populasi, keragaman dan aktifitas biota tanah (makro, meso dan microbiota)
Faktor tumbuh tanaman	Sumber berbagai senyawa yang berperan sebagai plant growth promoting substance	Memacu pertumbuhan tanaman
Kelarutan dalam air	Apabila berasosiasi dengan lempung atau dengan garam kation divalen/ trivalen maka bahan organik menjadi bersifat tidak larut	Memperkecil hilangnya bahan organik tanah karena pelindian (leaching)
Penyanggaan (<i>buffer action</i>)	Bahan organik mempunyai kemampuan penyanggaan pH tanah pada kisaran agak masam, netral dan alkalin	Menyangga tanah agar tidak mengalami perubahan kemasaman, alkalinitas dan salinitas secara cepat.
Pertukaran kation (<i>cation exchange</i>)	Kemasaman total dari fraksi humus berkisar 300-400 mEq/100 gram	Meningkatkan KTK. 20-80% KTK sebagian besar tanah (misal: Mollisol) disebabkan karena bahan organik
Penggabungan dengan molekul organik	Mempengaruhi bioaktivitas, persistensi dan biodegradabilitas pestisida	Modifikasi dalam aplikasi pestisida untuk efektivitas pengendalian organisme pengganggu tanaman
Pelapukan (<i>weathering</i>)	Memacu pelapukan mineral menjadi bentuk yang lebih larut (misal P)	Meningkatkan ketersediaan hara P dan hara mineral lain bagi tanaman
Kapasitas adsorpsi	Mempunyai kapasitas adsorpsi tinggi terhadap senyawa anorganik	Mengurangi bioavailabilitas senyawa xenobiotik (buatan) yang bersifat racun/bahan pencemar dalam tanah

Sumber: Smith et al., 1993; Wolf and Wagner, 2005.

1.3.2 Sumber Bahan Organik

Tumbuhan tingkat tinggi merupakan pemasok hara utama bagi biota tanah, yang pada gilirannya akan terbentuk senyawa

stabil yang dapat mempertahankan kandungan BOT. Pada kondisi alamiah, tajuk dan perakaran pepohonan, semak belukar, rumput-rumputan dan tumbuhan lain secara periodik akan memasok serasah ke dalam tanah. Apabila serasah tanaman pertanian tidak dijual atau untuk pakan ternak, maka $\frac{1}{10}$ sampai $\frac{1}{3}$ dari biomassa tanaman bagian atas tetap teronggok di permukaan tanah sehingga memasok bahan organik tanah. Selama peruraian BO, sebagian hasil peruraian tersebut akan terbawa air infiltrasi masuk kedalam tanah atau dibawa oleh fauna tanah ke dalam liang-liangnya. Hewan daratan merupakan sumber BOT kedua yang menghasilkan urin, kotoran dan juga tubuhnya setelah mati ke dalam tanah. Beberapa jenis hewan tanah, khususnya cacing tanah, rayap dan semut juga berperan penting dalam mengalih tempatkan serasah tanaman dan partikel tanah dari satu tempat ke tempat lain dalam tanah.

1.3.3 Peranan Bahan Organik dalam Tanah

Menurut Lines and Kelly (1993), ada beberapa peranan bahan organik di dalam tanah antara lain:

- 1) Memperbaiki struktur tanah, saat bahan organik terurai menjadi humus, maka partikel pasir, debu dan liat akan menyatu dan bahan organik menjadi agregat yang tidak akan terurai dalam air. Efek dari penyatuan ini maka akar tanaman akan mudah mengikat air.
- 2) Sumber Nutrisi, bahan organik merupakan sumber penting nitrogen, fosfor dan sulfur. Nutrisi tersedia ketika bahan organik diurai oleh mikroorganisme. Karena penguraian ini membutuhkan waktu, bahan organik menyediakan nutrisi dalam bentuk pelepasan lambat. Jika tanaman terus-menerus dikeluarkan dari tanah, tidak ada bahan organik yang dapat dimakan oleh mikroba dan

dipecah menjadi unsur hara, sehingga lebih sedikit unsur hara yang tersedia bagi tanaman.

- 3) Menahan Kelembaban Tanah, agregat juga sangat efektif dalam menahan kelembapan untuk digunakan oleh tanaman. Molekul humus dapat menyerap dan menahan air dalam jumlah besar untuk digunakan oleh akar tanaman.
- 4) Memperbaiki Drainase, agregat yang lebih besar dan stabil mempunyai jarak antar agregat yang lebih besar pula, sehingga memungkinkan udara dan air melewati tanah dengan lebih mudah.
- 5) Meningkatkan kapasitas pertukaran kation, molekul humus adalah koloid, yang merupakan struktur bermuatan negatif dengan luas permukaan yang sangat besar. Ini berarti mereka dapat menarik dan menahan nutrisi bermuatan positif dalam jumlah besar seperti kalsium, magnesium dan potasium hingga tanaman membutuhkannya. Tanah liat juga mempunyai kapasitas seperti ini, tetapi koloid humus mempunyai KTK yang jauh lebih besar dibandingkan tanah liat.

DAFTAR PUSTAKA

- College of Tropical Agriculture and Human Resources (CTHR).
2024. Soil Minerals.
https://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a_comp01.aspx
[diakses Februari 2024]
- Dick, W. A and Gregorich, E.G. 2004. Developing and Maintaining Soil Organic Matter Levels. In: Managing Soil Quality. Challenges in Modern Agriculture. Schjonning, P., Elmholt, S. and Christensen, B.T. (eds.). CABI Publish. 103-120.
- Gregorich, E. G., Turchenek, L. W., Carter, M. R. and Angers, D.A. (eds.). Soil and Environmental Science dictionary. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Karlen, DL., MJ. Mausbach, JW. Doran, R.G. Cline, RF. Harris, & GE. Schuman. 1996. Soil Quality: Concept, Rationale and Research Needs. Soil. Sci. Am. J: 60:33-43.
- Lines, R. and Kelly. 1993. Soil Sense. formerly soils media officer, Wollongbar Agricultural Institute, for CaLM and NSWA, north coast region, under the National Landcare Program.
- Mega, B. dan Vanya K. M. P. 2022. Komponen Penyusun Tanah beserta Proporsinya.<https://www.kompas.com/skola/read/2022/03/21/170000169/komponen-penyusun-tanah-beserta-proporsinya?page=all> [diakses 12 Feb 2024].
- Sanchez, P. A. 1992. Sifat dan Pengelolaan Tanah Tropika. Terjemahan Hamzah, A. Institut Teknologi Bandung: Bandung. 397 hal.
- Swift, M. J., Heal, O.W. and Anderson, J. M. 1979. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Smith, J. L., Papendick, R. I., Besdick, D. F. and Lynch, J. M. 1993. Soil Organic Matter Dynamics and Crop Residue

- Management. In: Soil Microbial Ecology. Applications in Agriculture and Environmental Management. Metting, F. B. Jr. (ed.) Marcel Dekker, Inc. 65-94.
- Wolf, D. C. and Wagner, G.H. 2005. Carbon Transformation and soil Organic matter Formation. In: Principle and Application of Soil Microbiology. Sylvia, D.M., Jeffery, J.F., Peter, G. H and David AZ., (Eds.). Pearson-Prentice Hall, New Jersey. 285-332.
- Yulipriyanto, H. 2010. Biologi Tanah dan Strategi Pengelolaannya. Graha Ilmu. Yogyakarta.

BAB 2

BAHAN-BAHAN PENYUSUN TANAH: AIR DAN UDARA

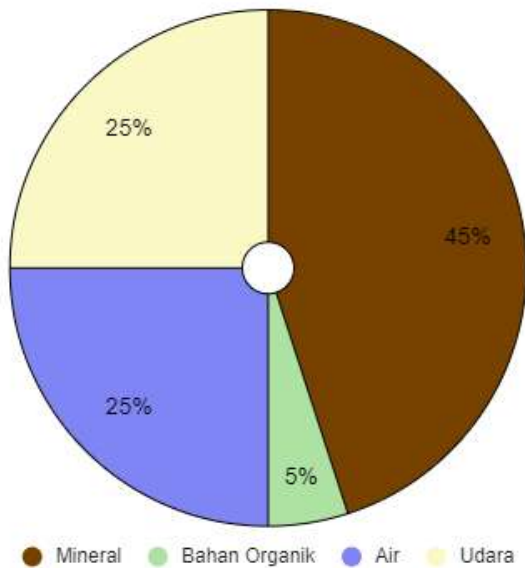
Oleh Indra Permana

2.1 Pendahuluan

Komponen penyusun tanah terdiri dari 2 struktur utama yakni bagian padatan dan pori-pori. Bagian padatan terdiri dari bahan mineral dan organik, sedangkan pada bagian pori-pori biasanya terisi oleh air dan udara. Setiap jenis tanah memiliki jumlah atau persentase (volume) komponen penyusun tanah yang berbeda-beda. Pada umumnya tanah mineral lapisan atas (lahan kering) mengandung 45% bahan mineral, 5% bahan organik, 20-30% udara dan 20-30% pori-pori (Gambar 3.1). Kondisi tersebut dapat berubah-ubah karena beberapa faktor seperti jenis batuan atau bahan induk, iklim (curah hujan dan temperatur) dan pengelolaan tanah.

Bahan mineral berasal dari proses pelapukan batuan sehingga setiap jenis tanah memiliki susunan mineral yang berbeda-beda. Tanah mineral berasal dari pelapukan batuan beku, batuan sedimen dan malihan (metamorf). Hardjowigeno (2007) mengatakan bahwa mineral tanah terbentuk dari proses rekristalisasi senyawa-senyawa lain atau pelapukan mineral primer dan sekunder. Mineral primer merupakan mineral yang belum mengalami perubahan struktur atau masih membawa sifat asli dari batuan induk pada proses pembentukan tanah.

Sebaliknya, mineral sekunder adalah mineral baru yang terbentuk dari hasil rekombinasi pemapukan mineral primer sehingga telah mengalami perubahan struktur asal (Salam, 2020). Partikel tanah memiliki ukuran diameter ≤ 2 mm yang terbagi menjadi tiga fraksi berdasarkan ukurannya yakni pasir (0,05-2 mm), debu (0.002-0.005 mm) dan liat (≤ 2 μ m).

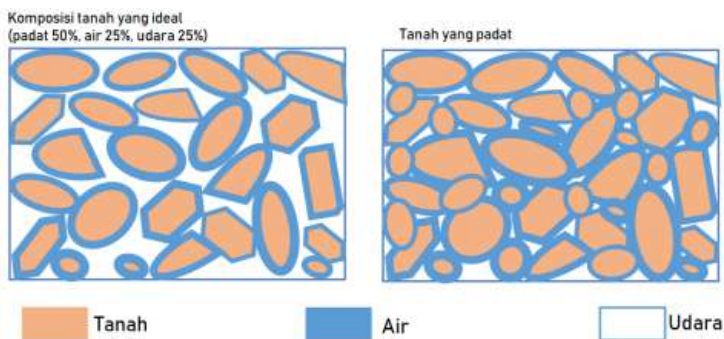


Gambar 2. 1. Ilustrasi persentase komponen penyusun tanah
(Sumber: Ilustrasi pribadi)

Bagian padatan tanah lainnya terisi oleh bahan organik yang idealnya menempati 5% bagian dari komponen penyusun tanah. Bahan organik merupakan bahan yang berasal dari jaringan tanaman dan hewan baik yang masih hidup maupun telah mati dan mengalami dekomposisi (Permana *et al.*, 2023). Organisme berperan penting dalam proses pembentukan tanah, aktivitas organisme di dalam tanah berpengaruh terhadap kandungan bahan organik tanah. Banyaknya populasi makhluk hidup di dalam tanah berkorelasi positif dengan kadar bahan

organik tanah. Bahan organik dikelompokkan menjadi dua yakni komponen yang mati dan hidup. Keberadaan akar tanaman, binatang dan biomassa mikroorganisme merupakan komponen hidup bahan organik karena aktivitasnya dapat meningkatkan bahan organik. Sedangkan komponen mati bahan organik berasal dari hasil dekomposisi makhluk hidup baik secara biologi maupun kimia yang menghasilkan residu organik (Asril *et al.*, 2022).

Bagian pori-pori merupakan bagian yang paling dinamis komposisinya karena dipengaruhi oleh berbagai macam faktor. Pada kondisi lembab atau setelah turun hujan, tentu pori-pori tanah akan lebih banyak terisi oleh air dibandingkan udara. Sebaliknya, pada saat kondisi kekeringan, pori-pori tanah akan lebih banyak terisi udara dibandingkan dengan air. Selain itu, komposisi air dan udara juga dipengaruhi oleh sifat fisik tanah seperti tekstur, struktur, porositas, bobot isi tanah dan lainnya. Hal tersebut berkaitan dengan jumlah atau banyak nya pori-pori tanah yang terdapat di dalam tanah. Perbandingan antara padatan dan pori yang terisi oleh air dan udara pada kondisi ideal dan padat ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Komposisi air dan udara pada dua kondisi berbeda

(Sumber: rizadosfir.wordpress.com, diakses pada Juni 2024)

2.2 Air (Larutan Tanah)

Pada umumnya larutan tanah menempati 20 – 25% komponen penyusun tanah atau setengah pori-pori tanah. Keberadaan air tanah sangat penting bagi tanaman untuk memenuhi kebutuhan air dan hara tanaman. Hal tersebut dikarenakan air tanah berfungsi sebagai pelarut unsur hara baik berupa kation, anion ataupun senyawa molekul yang dibutuhkan oleh tanaman. Air tanah dapat berasal dari air hujan dan atau air irigasi yang tertahan oleh partikel tanah secara adhesi dan kohesi. Air dapat menempati pori mikro, meso bahkan makro tergantung daripada jumlah air yang diterima atau kondisi kejenuhan air. Dalam kondisi jenuh air, pori makro yang terisi air akan cepat hilang karena adanya gaya gravitasi sehingga pori tersebut akan terisi udara karena air menuju bagian bawah dan menghasilkan air gravitasi.

Kondisi dimana jumlah air dan udara dalam keadaan ideal menempati volume atau pori tanah dengan masing-masing sebesar 25% disebut dengan Kapasitas Lapang (KL). Keadaan kapasitas lapang merupakan kondisi yang baik untuk tumbuh dan berkembangnya tanaman. Hal tersebut dikarenakan masih terdapat air yang tertahan pada pori meso dan mikro. Namun, pada kondisi sangat kering, air tersebut akan meninggalkan pori meso dan mikro sehingga hanya menyisakan sedikit lapisan air pada partikel tanah, kondisi ini biasa disebut dengan titik layu permanen. Dikatakan layu permanen dikarenakan tanaman mengalami kelayuan secara permanen atau tidak dapat kembali seperti sedia kala. Air tersedia bagi tanaman berada pada kondisi sekitar kapasitas lapang dan di atas titik layu permanen (Salam, 2020).

2.2.1 Peran dan Fungsi Air Tanah

Air merupakan salah satu elemen yang berperan sebagai sumber kehidupan bagi makhluk hidup. Air di dalam tanah juga memiliki peranan dan fungsi yang sangat penting bagi ekosistem tanah dan yang ada di permukaannya. Adapun peran air tanah dalam bidang pertanian diantaranya :

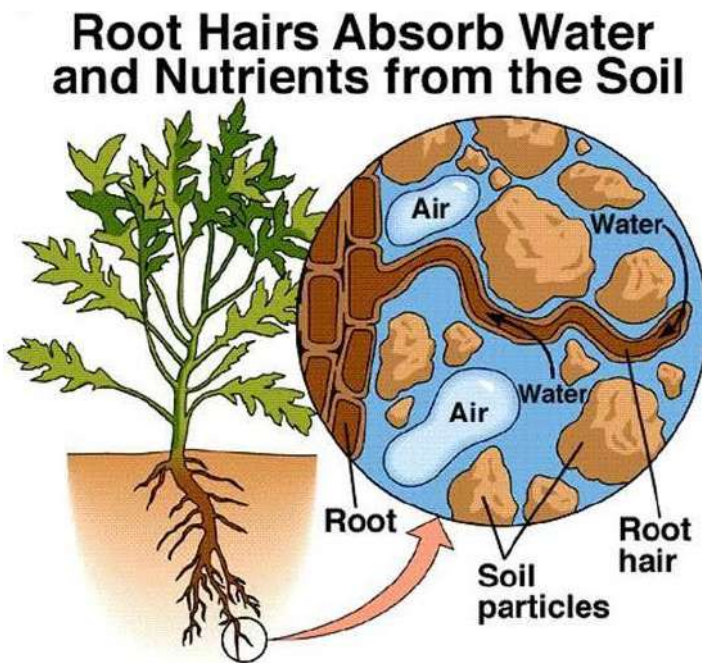
Peran dan Fungsi Bagi Tanaman

Tanaman menyerap air untuk membentuk sel tanaman. Sel tanaman terbentuk dari protoplasma yang terdiri dari sitoplasma dan inti sel dimana keduanya sangat bergantung pada ketersediaan air untuk pembentukan struktur dan menjalankan fungsinya. Kekurangan air dapat menurunkan tekanan turgor tanaman yang berfungsi menjaga bentuk dan kekuatan daun, batang dan bunga (Purba *et al.*, 2021). Oleh karena itu, tanaman yang kekurangan air akan terlihat layu dan tidak kokoh. Air juga merupakan salah satu bahan utama dalam melaksanakan proses fotosintesis, dimana air dan karbon dioksida diubah menjadi glukosa dan oksigen menggunakan energi cahaya matahari (Asril *et al.*, 2023).

Sebagai Pelarut Unsur Hara

Air tanah memiliki peran kritis dalam ekosistem pertanian dan lingkungan alami, terutama karena fungsinya sebagai pelarut unsur hara. Sebagaimana yang telah diketahui bahwa pada umumnya tanaman menyerap unsur hara dalam bentuk ion, yaitu kation dan anion. Di dalam tanah, unsur hara seringkali terikat oleh unsur lain sehingga membentuk senyawa yang tidak larut dan sukar untuk diserap tanaman. Pada saat tersebut, air berperan sebagai pelarut yang mampu mengubah senyawa tersebut menjadi ion-ion yang dapat diserap oleh tanaman (Zhang *et al.*, 2016). Selain itu, air tanah juga digunakan oleh mikroorganisme dalam mendekomposisi bahan organik

sehingga menghasilkan produk humus dan non humus seperti unsur hara. Pada konteks ini, ketersediaan air tanah mempengaruhi terjadinya siklus unsur hara pada tanah. Fungsi utama larutan tanah adalah menyuplai unsur hara mineral bagi tanaman yang sedang tumbuh. Tanaman menyerap unsur-unsur penting dari larutan tanah untuk pertumbuhannya. Pasokan unsur hara dalam larutan terus menerus diisi kembali oleh koloid tanah seiring dengan penyerapannya oleh tanaman (Gambar 2.3).



Gambar 2. 3. Penyerapan unsur hara dari larutan tanah melalui akar

(Sumber: <https://plantlet.org/>)

Sebagai Transport Unsur Hara

Setelah unsur hara terlarut larut dalam air, air membawa unsur hara tersebut saat bergerak melalui tanah menuju zona akar tanaman. Akar tanaman mempunyai banyak rambut akar dengan luas permukaan yang luas sehingga efisien dalam menyerap air dan unsur hara. Air tanah yang kaya nutrisi bergerak melintasi kapiler tanah menuju akar tanaman, tempat nutrisi diserap melalui osmosis dan transpor aktif. Transportasi nutrisi memungkinkan tanaman memperoleh pasokan nutrisi yang dibutuhkan untuk berbagai proses metabolisme dan pertumbuhan.. Penyerapan unsur hara di dalam tanah terdiri dari 3 mekanisme yakni intersepsi akar, difusi dan aliran massa. Pada mekanisme aliran massa, unsur hara pada larutan tanah terangkut oleh air menuju daerah perakaran dan menyentuh akar tanaman (McGrath, Spargo and Penn, 2014a). Mekanisme ini sangat bergantung pada ketersediaan air tanah. Apabila ketersediaan air rendah maka tanaman akan menyerap unsur hara melalui mekanisme intersepsi akar dan juga difusi.

2.3 Udara Tanah

Udara tanah mengisi ruang pori-pori yang tidak terisi oleh air. Pori udara tersebut terisi oleh beberapa gas yang pada umumnya hampir sama dengan gas penyusun atmosfer. Gas utama yang berada pada rongga pori di dalam tanah diantaranya adalah CO_2 , O_2 dan gas nitrogen (Asril *et al.*, 2022). Terjadinya aktivitas mikroorganisme di dalam tanah, dekomposisi bahan organik, dan respirasi akar menyebabkan jumlah CO_2 di dalam tanah lebih tinggi dibandingkan atmosfer. Sebaliknya, kondisi O_2 tanah lebih rendah dibandingkan dengan di atmosfer terutama pada kondisi anaerob dimana udara tanah lebih banyak terisi oleh gas CH_4 dan H_2S dibandingkan O_2 . Komposisi udara di

dalam tanah hanya sedikit berbeda dengan komposisi udara di atmosfer. Perbandingan udara pada tanah dan atmosfer disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Perbedaan konsnetrasi udara pada tanah dan atmosfer

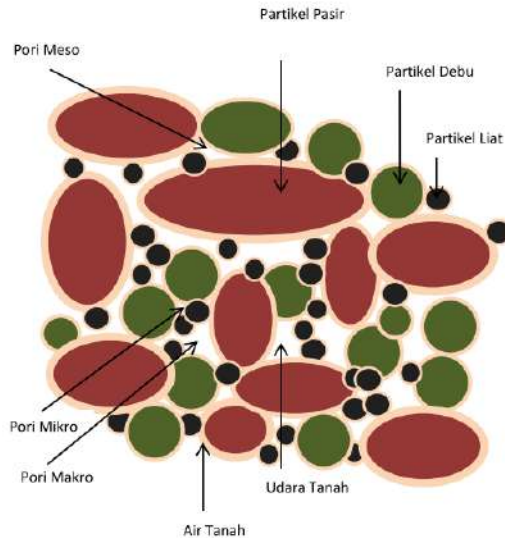
Komponen Udara	Udara Atmosfer	Udara Tanah
	Komposisi Berdasarkan Volume	
Nitrogen	79%	79%
Oksigen	20,96%	20,3%
Karbondioksida	0,035%	0,15 – 0,65%

Sumber: <https://thegma.org.uk>, 2024

Sama hal nya dengan jumlah air pada pori-pori, jumlah udara tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor salah satunya dari sifat fisik tanah. Sifat fisik tanah yang dimaksud diantaranya tekstur, struktur, bobot jenis, permeabilitas atau infiltrasi dan porositas tanah. Tekstur tanah yang dominan pasir maka akan lebih banyak memiliki pori makro yang terisi oleh udara dibandingkan air. Hal tersebut menjadikan tanah lebih porous dan cepat dalam meneruskan air. Sebaliknya, tanah yang dominan liat akan sangat sukar dalam meneruskan udara dan air karena lebih banyak pori mikro yang terbentuk dibandingkan meso dan makro.

Tanah yang mengalami pemadatan akan meningkatkan bobot isi tanah sehingga pori-pori udara akan lebih sedikit dan lebih sulit dalam meneruskan air dan udara (Ferreira *et al.*, 2023). Untuk memperbaiki hal tersebut adalah dengan memberikan bahan organik kepada tanah sehingga dapat membentuk agregat tanah dan memperbaiki struktur tanah. Hal tersebut akan berdampak terhadap peningkatan jumlah ruang

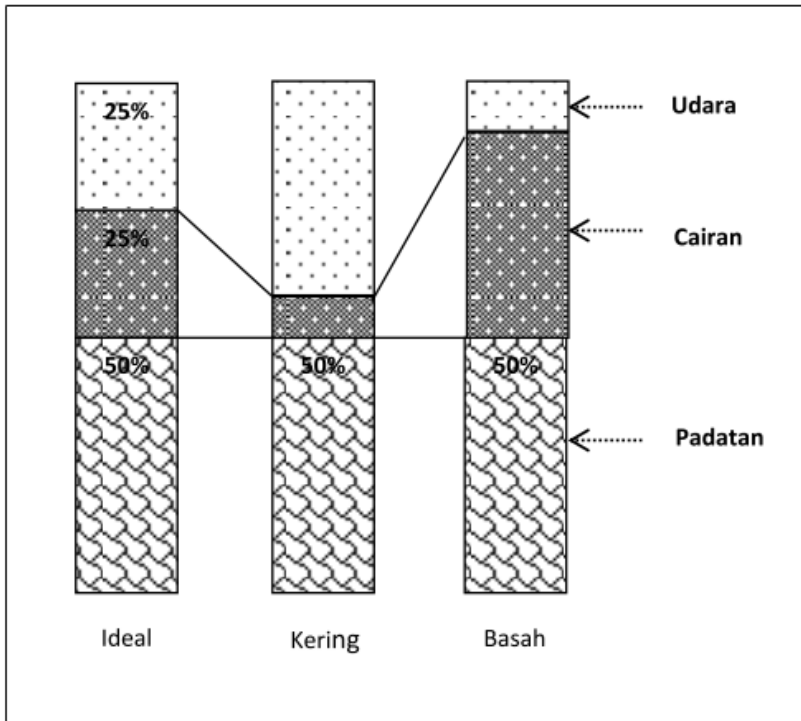
atau pori-pori tanah. Udara tanah lebih banyak mengisi ruang pada pori makro dibandingkan meso dan mikro. Hal tersebut dikarenakan adanya gaya gravitasi yang menyebabkan air tanah pada pori makro akan lebih cepat diteruskan (Gambar 2.4).



Gambar 2. 4. Gambaran tentang pori-pori tanah

(Sumber: Salam, 2020)

Udara di dalam tanah sangat penting untuk dijaga karena terdapat aktivitas makhluk hidup di dalamnya. Oleh karena itu, menjaga keseimbangan komposisi air dan udara merupakan hal yang penting untuk dilakukan agar dapat mendukung pertumbuhan tanaman dan makhluk hidup yang tinggal di dalam tanah. Pengolahan tanah dapat membantu dalam menciptakan pori-pori tanah bila dilakukan dengan bijak dan hanya pada lapisan tanah atas (Basuki *et al.*, 2023). Meskipun kegiatan pengolahan tanah dapat menghancurkan agregat dan struktur tanah yang terbentuk secara alami. Persentase perbandingan udara dan air di dalam tanah ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5. Dinamika perubahan komposisi air dan udara di dalam tanah

(Sumber: Salam, 2020)

2.3.1 Peran dan Fungsi Udara Tanah

Udara tanah berperan penting dalam mengubah lingkungan fisik, kimia dan biologi tanah sehingga sangat mempengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman. Hal-hal penting mengenai peranan dan fungsi udara tanah adalah:

Respirasi Akar

Keberadaan oksigen pada pori-pori tanah sangat penting untuk proses respirasi akar tanaman dan organisme tanah. Respirasi merupakan proses perombakan karbohidrat untuk

menghasilkan energy dengan bantuan oksigen. Proses respirasi tersebut menghasilkan energy kimia yang disebut dengan Adenosin Tri Phospate (ATP). Respirasi tersebut terjadi dalam kondisi aerob, sedangkan pada kondisi anaerob proses respirasi tidak melibatkan oksigen melainkan merombak glukosa yang berfungsi sebagai sumber tenaga. Meskipun proses respirasi dapat terjadi pada kedua kondisi tersebut, respirasi aerob mampu menghasilkan energy yang jauh lebih besar (36 ATP) dibandingkan anaerob (2 ATP) (Wiraatmaja, 2016). Energi yang diperoleh dari proses respirasi tersebut digunakan tanaman untuk menjalankan proses pembentukan dan perbaikan jaringan tanaman, menyerap air serta unsur hara di dalam tanah dan beradaptasi terhadap stress lingkungan.

Aktivitas Mikroorganisme

Mikroorganisme tanah terbagi menjadi aerob dan anaerob. Namun, keberadaan mikroorganisme aerob tanah lebih banyak dibandingkan anaerob. Mikroorganisme tersebut memiliki peranan yang sangat penting di dalam tanah seperti perombakan bahan organik dan siklus nutrisi (Permana *et al.*, 2023). Untuk mendukung aktivitas dan meningkatkan populasi mikroorganisme aerob di dalam tanah, keberadaan oksigen menjadi hal yang utama. Seperti halnya proses nitrifikasi, bakteri Nitrosomas dan Nitrobacter memerlukan oksigen untuk mengoksidasi ammonia (Foth, 1990; McGrath, Spargo and Penn, 2014b). Kurangnya oksigen di dalam tanah tentu akan menurunkan aktivitas mikroorganisme yang sejalan dengan rendahnya tingkat kesuburan dan kesehatan tanah. Proses perombakan bahan organik berlangsung cepat dengan adanya bantuan mikroorganisme tanah dan pada prosesnya memerlukan oksigen dan juga air.

2.4 Hubungan Sifat Fisik Tanah dan Komposisi Air dan Udara

Sifat fisik tanah dapat berpengaruh terhadap komposisi air dan udara pada tanah baik secara langsung maupun tidak langsung. Sifat tanah yang mempengaruhi pori-pori tanah secara langsung diantaranya tekstur dan struktur tanah. Tanah dengan tekstur kasar atau dominan pasir tentunya akan lebih banyak memiliki pori-pori makro dibandingkan dengan pori meso dan mikro. Tanah bertekstur kasar tidak dapat mempertahankan air sehingga pori tersebut akan lebih banyak terisi oleh udara tanah. Hal tersebut akan berpengaruh terhadap sifat tanah lainnya yakni infiltrasi tanah. Infiltrasi merupakan kemampuan tanah dalam meneruskan air dan udara yang ada di dalam tanah (Gusmara, 2016).

Sifat tanah lainnya adalah struktur tanah. struktur tanah terbentuk dari kumpulan agregat tanah. Agregat tanah merupakan kumpulan partikel-partikel tanah yang saling berikatan dan dipengaruhi oleh bahan organik dan mineral liat (Rosyidah and Wirosodarmo, 2013). Tanah dengan struktur butiran tunggal akan membentuk pori makro lebih banyak dibandingkan dengan pori mikro. Kondisi tersebut kurang baik dalam menahan air. Sebaliknya, tanah dengan struktur berlempeng lebih banyak membentuk pori mikro sehingga air sulit masuk ke dalam tanah. Kondisi ini menurunkan ketersediaan udara dan air di dalam tanah. Struktur tanah yang baik harus dapat menjaga keseimbangan air dan udara di dalam tanah sehingga infiltrasi dan aerasi tetap berjalan secara optimal dan mampu mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Asril, M. *et al.* (2022) *Ilmu Tanah*. Yayasan Kita Menulis.
- Asril, M. *et al.* (2023) *Kesuburan Tanah dan Pemupukan Tanah, Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Basuki *et al.* (2023) *Budidaya Tanaman*. Edited by M. K. Dr. Neila Sulung, S.Pd., Ns. PT. Get Press Indonesia.
- Ferreira, C. J. B. *et al.* (2023) 'Physiological and agronomic response of soybean cultivars to soil compaction in the Brazilian Cerrado', *Bragantia*, 82. doi: 10.1590/1678-4499.20220160.
- Foth, H. D. (1990) *Fundamental of Soil Science 8th Edition*.
- Gusmara (2016) 'Bahan Ajar Dasar-dasar Ilmu Tanah ITN-100 Universitas Bengkulu Fakultas Pertanian Tim Pengampu', *Jurnal Bahan Ajar*, 7(3), pp. 1–92.
- Hardjowigeno, S. 2007. *Dasar Ilmu Tanah*. CV Akademika Pressindo. Jakarta
- McGrath, J. M., Spargo, J. and Penn, C. J. (2014a) 'Soil Fertility and Plant Nutrition', *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 5, pp. 166–184. doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7.
- McGrath, J. M., Spargo, J. and Penn, C. J. (2014b) 'Soil Fertility and Plant Nutrition', in *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7.
- Permana, I. *et al.* (2023) *Kesuburan Tanah dan Pemupukan, Get Press I*. Edited by D. P. Sari. Get Press Indonesia.
- Purba, T. *et al.* (2021) *Tanah Dan Nutrisi Tanaman, Yayasan Kita Menulis*.
- Rosyidah, E. and Wirosoedarmo, R. (2013) 'Effect of Soil Physical Properties on Saturated Hydraulic Conductivity in The 5 Land Use (A Case Study in Summersari Malang)', *Agritech*, 33(3), pp. 340–345.

- Salam, A. K. (2020) *Ilmu Tanah, Akademika Pressindo*.
- Wiraatmaja, I. wayan (2016) *Respirasi Dan Fotoresiparasi, Universitas Udayana*.
- Zhang, Y. *et al.* (2016) 'The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives', *Eurasian Soil Science*, 49(6), pp. 661–672. doi: 10.1134/S1064229316060120.

BAB 3

ORGANISME DAN BAHAN ORGANIK

Oleh Amin Mbusango

3.1 Pendahuluan

Tanah merupakan lapisan atas kerak bumi yang berubah akibat proses pelapukan, baik secara fisika, kimia dan biologi, yang terdiri dari partikel mineral, bahan organik, air, udara, dan organisme hidup yang tersusun dalam satu kesatuan tubuh tanah (Y. F. Wang et al., 2022). Konsep ini mencakup organisme tanah sebagai bagian satu kesatuan dari tanah termasuk tumbuhan (Harahap et al., 2021), mikroorganisme, hewan yang interaksinya, mampu menyediakan fungsi dan jasa ekosistem. Organisme tanah berfungsi mendukung produktivitas tanaman, siklus hara dan air serta pembentukan tanah, mengatur erosi tanah dan pemurnian air, atau sekadar menyediakan sumber keanekaragaman hayati (Brussaard et al., 2007)

Menurut laporan FAO tahun (*State of Knowledge of Soil Biodiversity - Status, Challenges and Potentialities*, 2020) tanah adalah salah satu gudang utama keanekaragaman hayati global, lebih dari 40% organisme hidup di dalam ekosistem tanah (Decaëns et al., 2006). Faktanya, tanah merupakan salah satu tempat atau rumah utama bagi keanekaragaman hayati (Bardgett & van der Putten, 2014). Didalam ekosistem tanah organisme berpartisipasi dalam berbagai proses ekologi, termasuk dekomposisi bahan organik, siklus nutrisi, dan perlindungan terhadap patogen tanaman (Zhang, 2013; Coleman

& Whitman, 2005). Tanah merupakan sistem yang kompleks dan heterogen, yang terdiri dari agregat organo-mineral dengan berbagai ukuran dan komponen organik, yang menciptakan habitat bagi keanekaragaman hayati tanah pada berbagai skala spasial. Keragaman komposisi habitat dengan pori tanah dan ukuran berbeda yang berisi udara dan/atau air memungkinkan menjadi tempat hidup atau rumah bagi sejumlah organisme tanah (Coleman et al., 2018).

Seiring perkembangan waktu yang lebih lama, tanah mengalami perkembangan pedologis sesuai dengan bahan induknya dan kondisi lingkungan dimana tanah tersebut terbentuk. Tanah yang mengalami gangguan aktivitas manusia baik dengan proses fisik dan biologis tertentu terjadi pada tanah akan berdampak terhadap tekanan fisik, kimia, dan biologis yang dialami tanah tersebut.

Organisme tanah juga berpotensi memengaruhi hasil pertanian. Peran organisme dapat mendukung peningkatan ketersediaan hara bagi tanaman, merangsang pertumbuhan tanaman dan menghasilkan senyawa bioaktif yang dapat merangsang pembelahan sel, dan mengurangi risiko infeksi oleh patogen tanaman (Blanco-Pérez et al., 2020). Lebih penting lagi, organisme tanah dapat berperan dalam memitigasi dampak perubahan iklim dengan mengikat karbon dalam tanah (Isabwe et al., 2022).

Namun, perubahan praktik pertanian modern, termasuk penggunaan pestisida dan pupuk kimia yang berlebihan, akan mengganggu ekologi organisme tanah. Gangguan ini dapat mengakibatkan penurunan keanekaragaman Organisme tanah, yang pada gilirannya dapat memengaruhi kesehatan tanaman dan produktivitas pertanian (Dev & Chakrawarti, 2022). Oleh karena itu, penting untuk memahami peran ekologi organisme tanah dalam pertanian dan bagaimana praktik pertanian

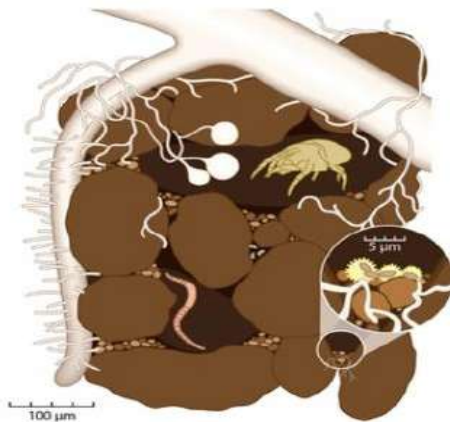
berkelanjutan dapat mendukung kesehatan tanaman dan keberlanjutan ekosistem tanah.

3.2 Organisme Tanah

Umumnya kehidupan di Bumi bergantung pada tujuh unsur penting: hidrogen (H), karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), oksigen (O), dan belerang (S) yang melewati proses perubahan oleh organisme tanah. Proses siklus biogeokimia didefinisikan sebagai transformasi dan siklus unsur-unsur antara materi tak hidup (abiotik) dan materi hidup (biotik) melintasi permukaan daratan, udara, dan air. Proses biogeokimia bergantung pada organisme di dalam tanah atau pedosfer. Pedosfer adalah lapisan terluar bumi yang tersusun dari tanah dan mengalami proses pembentukan tanah. Peran biota tanah di pedosfer menggunakan prinsip ekologi yang menghubungkan organisme tanah dan tumbuhan dengan proses biogeokimia yang terjadi di dalam tanah pada ekosistem alami.

Aktifitas organisme tanah mempengaruhi struktur dan tekstur tanah, perakaran tanaman, serta kandungan bahan organik (Bonato Asato et al., 2023). Aktifitas organisme tanah berkaitan dengan semua aktifitas mikroorganisme tanah baik organisme hidup maupun organisme mati. Organisme tanah memainkan peran penting dalam proses penggemburan tanah dan distribusi ukuran pori (X. Wang et al., 2024). Agregat secara luas dapat diklasifikasikan menjadi makroagregat ($>250\text{ }\mu\text{m}$) dan mikroagregat ($20\text{-}250\text{ }\mu\text{m}$). Agregat adalah kumpulan pasir, debu, liat, bahan organik, dan perakaran halus, serta organisme yang terbentuk secara alami. Organisme dan perakaran tanaman mampu mengeluarkan sekresi, polisakarida ekstraseluler, dan hifa (filamen) jamur serta pori-pori yang dihasilkan. Agregat

tanah sering kali mengandung akar-akar halus yang menembus ke dalam pori-pori tanah.



Gambar 3. 1. Asosiasi agregat pada Areal rhizosfer.

(<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-soil-biota-84078125/>).

Bahan pengikat tanah sehingga membentuk agregat tanah yaitu bersumber dari organisme dalam bentuk polisakarida dan glomalin yang membantu pembentukan makroagregat yang terkandung dalam mikroagregat yang lebih stabil. Agregat makro ini berfungsi sebagai “ekosistem atau ruang aktivitas” organisme (Coleman et al., 2004). Jadi, agregat adalah satuan struktur tanah yang dapat dianggap sebagai model pedosfer berskala sangat kecil.

Organisme tanah terdiri dari mikroflora, mikrofauna, mesofauna, makrofauna dan megafauna. Organisme tanah seperti bakteri, jamur, archaea, alga, protozoa, nematoda, tungau, springtail, laba-laba, serangga, dan cacing tanah. Organisme tanah memiliki ekosistem hidup didalam di tanah atau pedosfer. Jutaan spesies organisme tanah ada namun hanya sebagian kecil saja yang telah dibudidayakan dan diidentifikasi.

Mikroflora dan mikroorganisme (jamur, archaea, bakteri, alga dan cyanobacteria) merupakan anggota biota tanah tetapi.

Sumber energi organisme tanah yaitu berasal dari keberadaan bahan organik dan biomassa yang berhubungan erat dengan siklus karbon dalam tanah. Gayan et al., (2023) berpendapat bahwa Organisme tanah berpengaruh terhadap karakteristik biologi, kimia dan fisik tanah, dimana struktur komunitas biotik dapat mempengaruhi siklus biogeokimia yang terjadi di dalam tanah. Berdasarkan ukurannya organisme tanah biasanya dibagi menjadi lima kelompok dari yang terbesar hingga ukuran yang terkecil (Luan et al., 2020).

3.2.1 Megafauna

Megafauna merupakan organisme tanah terbesar dan termasuk cacing tanah terbesar, mungkin merupakan makhluk paling penting yang hidup di lapisan atas tanah. Cacing tanah mengeluarkan tanah dan bahan organik melalui ususnya, dalam proses mengaerasi tanah, memecah serasah bahan organik di permukaannya, dan memindahkan bahan secara vertikal dari permukaan ke lapisan bawah tanah. Hal ini sangat penting bagi kesuburan tanah, dan mengembangkan struktur tanah sebagai matriks bagi tanaman dan organisme lainnya. Diperkirakan cacing tanah membalik seluruh permukaan tanah di planet ini hingga kedalaman satu inci (2,5 cm) setiap 10 tahun. Beberapa vertebrata juga masuk dalam kategori megafauna; ini termasuk semua jenis hewan penggali, seperti ular, kadal, pedagang kaki lima, musang, kelinci, terwel, mencit, dan tikus tanah (Zhu et al., 2024).

3.2.2 Makrofana

Makrofauna merupakan organisme tanah yang hidup dipermukaan tanah maupun di dalam lapisan tanah. Tubuh dari makrofauna tanah memiliki diameter antara 2-20 mm (Coleman et al., 2004). Umumnya makrofauna berperan dalam proses pengangkutan dan pencampuran tanah (*bioturbasi*), dekomposer, aliran karbon dan redistribusi hara, yang berdampak pada percepatan ketersediaan hara dan pembentukan tanah (Winsome, 2005;Zulkaidhah et al., 2022). Dalam agrosistem berkelanjutan, cacing tanah bermanfaat bagi metabolisme tanaman dan produksi tanaman, menyebabkan peningkatan aktivitas pengikatan nitrogen, jumlah makro dan mikronutrien serta polisakarida yang tersedia lebih banyak, dan peningkatan biosintesis zat pengatur tumbuh (Galli, 2017; Negassa & Sileshi, 2018). Selain itu juga makrofauna berperan aktif dalam merubah tata ruang sifat fisik dan kimia tanah. Oleh sebab itu makrofauna tanah dapat dijadikan bioindikator dalam menilai Kesehatan tanah.

Contoh organisme tanah yang termasuk dalam kelompok makrofauna yaitu semut, kalajengking, laba-laba, rayap dan cacing. Kelompok makrofauna tersebut memiliki peran spesifik masing-masing di dalam tanah. Semut berperan sebagai bioturbansi, pembuatan lubang aerase, decomposer serta menjadi penyerbuk dan predator bagi organisme pengganggu. Cacing sebagai standar yang baik untuk menilai status horizon organik tanah, perubahan pH, kelembaban tanah dan kualitas bahan organik. Rayap berperan dalam peningkatan struktur tanah, dekomposer bahan organik dan rekayasa ketersediaan hara (Al-Maliki et al., 2021).

3.2.3 Mesofauna

Organisme dalam kelompok mesofauna tanah merupakan invetebrata yang hidup di permukaan maupun di dalam tanah, berukuran 100 μm hingga <2 mm. Contoh Anggota kelompok ini antara lain nematoda, tungau, springtail (collembola), proturan, pauropoda, rotifera, tardigrades, laba-laba kecil, pseudoscorpion, opiliones (pemanen), enchytraeidae seperti cacing pot, larva serangga, isopoda kecil. Mesofauna dapat memainkan peran penting dalam siklus karbon dan kemungkinan besar akan terkena dampak buruk perubahan iklim.

➤ Collembola

Collembola yaitu hewan arthropoda yang berukuran kecil 0,1 – 0,9 mm dan memiliki tubuh yang lunak dan umumnya ditemukan berasosiasi dengan bahan organik. Habitat utama dari Collembola adalah permukaan tanah yang banyak mengandung sisa-sisa tanaman, atau bahan organik tanah (Bellini et al., 2023). Collembola terkecil yang ditemukan berukuran sekitar 0,12 mm. collembola memiliki fungsi sebagai perombak bahan organik, pemakan jamur dan indikator perubahan keadaan tanah (Coleman et al., 2004)

➤ Acari

Acari adalah spesies fauna tanah yang hidup bebas dan menempati berbagai ruang ekosistem yang berhubungan dengan tanah dan serasa. Acari termasuk golongan filum *Arthropoda* dan kelas *Arthropoda* yang memiliki 4 pasang kaki pada bagian sefalotoraks, tubuh berukuran pendek, tidak memiliki segmen dan sayap (Rogers et al., 2020). *Acari* banyak ditemukan hidup dengan invetebrata tanah kecil lainnya, seperti springtails, enchytraeds, larva serangga dan orbitadids. Sebagian besar

acari lebih menyukai habitat yang kaya bahan organik, dengan kelembaban tanah tinggi, suhu tanah sedang, dan pH rendah. Karena persyaratan ekologis dan kepekaannya terhadap gangguan lingkungan/antropogenik, acari tanah sering digunakan sebagai kontrol biologi atau predator terhadap telur dan larva nematoda lainnya serta sebagai bioindicator tanah (Sanghaw et al., 2023)

3.2.4 Mikrofauna

Mikrofauna merupakan organisme tanah yang berukuran $<100\ \mu\text{m}$ (Coleman et al., 2004). Peranan dari mikrofauna yaitu kemampuannya melakukan mineralisasi berbagai hara secara langsung (melalui aktivitas metabolik) ataupun secara tidak langsung (melalui produksi produk-produk metabolit ekstraseluler), di samping juga berperan pelalpuhan bahan organik yang lebih stabil melalui perannya dalam humifikasi (Indriyani, 2018). Di dalam tanah mikrofauna berinteraksi dengan makrofauna (Coleman et al., 2004), yang berperan dalam proses penguraian bahan organik dan penyediaan unsur hara bagi tanaman sehingga kesuburan tanah tetap terjaga. Selain itu mikrofauna mampu menekan peningkatan populasi organisme patogen, memperbaiki struktur dan pori tanah, pecampuran bahan organik dengan tanah, mineralisasi dan pelepasan unsur hara, dan membantu memacu pendistribudian mikroba. Sewcara umum mikrofauna dapat dibagi 2 kelompok yaitu kelompok nematoda dan kelompok protozoa.

Nematoda merupakan filum hewan yang termasuk dalam Kerajaan animalia. Nematoda termasuk dalam kelompok yang bersifat multiseluler yang memiliki saluran pencernaan lengkap dan memiliki keragaman tinggi serta merupakan hewan mikroskopik dengan panjang tubuh $<2\ \text{mm}$ yang berdiameter $0,05\ \text{mm}$. hewan ini biasa digunakan sebagai bioindikator

menilai kesehatan tanah karena informasi taksonomi dan peranannya. Nematoda mampu berperan dalam proses dekomposisi, pelapukan materi organik dan agen pengendali organisme pengganggu tanaman. Nematoda tanah dapat dikelompokkan berdasarkan kebutuhan makanan seperti pemakan akar, pemakan hifa fungi, pemakan bakteri, omnivora, dan juga predator.

Protozoa merupakan mikroorganisme yang bersel tunggal yang mampu hidup sendiri atau hidup berkelompok. Protozoa memiliki membran nukleas yang lengkap, baik dalam susunan maupun fungsinya. Sehingga takheran protozoa sanggup melakukan semua fungsi hidupnya. Protozoa parasit yang bergerak menggunakan kaki semu, silia, atau flagella. Flagella yang digunakan untuk bergerak dan digunakan juga sebagai alat bantu mengambil makanan (Bjørnlund & Rønn, 2008). Protozoa berperan selain sebagai parasit, di dalam tanah keberadaannya dapat menjaga kesuburan tanah dengan menyediakan suplai nitrogen dan menekan populasi bakteri (Venter et al., 2018).

3.2.5 Mikroflora

Mikroflora tanah (termasuk dalam kelompok fungi) yang berperan dalam mineralisasi bahan organi (Rochimi Setiawati et al., 2020) sehingga meningkatkan ketersediaan hara. Fungi yang biasa digunakan yaitu Mikoriza dan Trichoderma.

Peran Fungi mikoriza yaitu mampu meningkatkan ketersediaan hara bagi tanaman melalui hifa yang menyerap hara dan mampu menembus pori tanah yang sangat halus. Fungi mikoriza mampu bersimbiosis dengan perakaran tanaman yang akan membantu tanaman dalam penyerapan hara yang langsung melalui epidermis akar dan rambut akar. Hara yang diserap hifa akan ditranslokasikan langsung kedalam sel korteks akar, di mana arbuscules atau kumparan hifa menyediakan *interface*

simbiosis atau sarana penghubung sistem translokasi pertukaran senyawa antara fungi dan tanaman (Talwar & Chatli, 2018). Peningkatan penyerapan hara tanaman yang dibantu oleh fungi mikoriza akan meningkatkan respons tanaman dalam bentuk pertumbuhan vegetatif dan peningkatan pertumbuhan fase generatif yang berdampak pada peningkatan produksi tanaman (Liu et al., 2023). (Anggiani et al., 2021) menunjukkan fungi Arbuscular mycorrhizal (FMA) dan *Trichoderma* spp. dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan meningkatkan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik pada banyak tanaman pertanian.

Trichoderma berperan sebagai pengendalian penyakit bukan hanya aspek antagonistiknya saja, tetapi sebagian penginduksi respons tahan tanaman baik secara lokal maupun sistemik terhadap patogen dan cekaman lingkungan di samping fungsi dekomposisi bahan organik juga membantu suplai nutrisi bagi tanaman.

3.3 Peran Organisme Tanah terhadap Kesuburan Tanah

Keberadaan organisme tanah sangat penting sebagai penentu untuk keberlangsungan kesuburan tanah. Seluruh bentuk proses yang terjadi di dalam tanah tidak terlepas dari peran dari organisme. Organisme tanah berperan memperbaiki kesuburan tanah, baik yang terlihat secara fisik maupun dalam bentuk senyawa kimia. Secara fisik seperti memecah bahan organik menjadi humus, mencampur bahan organik dengan tanah, pembentukan kemantapan agregat antara bahan organik dan bahan mineral tanah. Selain itu organisme tanah berperan juga dalam pembentukan struktur tanah, pori tanah, percepatan

aliran karbon, distribusi haradan mempercepat siklus hara (Wolf et al., 2023; Guo et al., 2024).

Organisme tanah sangat sensitif terhadap perubahan iklim sehingga pada lahan pertanian banyak mengalami penurunan organisme tanah. Oleh sebab itu perlu dikurangi atau ditekan penggunaan pestisida dan pemupukan menggunakan bahan kimia yang terus menerus agar memastikan ekosistem lahan tersebut berjalan dengan baik. Organisme tanah memiliki peran penting dalam kesuburan tanah, sehingga bagaimana solusi atau cara untuk mempertahankan keberadaan organisme dalam tanah agar menjaga lahan yang terus berkelanjutan.

Proses pengomposan, organisme tanah sangat berperan penting artinya dalam mendegradasi sampah. Adanya bahan organik tanaman dapat meningkatkan aktivitas organisme tanah, karena bahan organik digunakan sebagai sumber energi dan sumber makanan untuk kelangsungan hidupnya. organisme tanah merupakan salah satu komponen biologi tanah yang memainkan peran penting dalam proses penggemburan tanah. Peran aktif organisme tanah dalam menguraikan bahan organik dapat mempertahankan dan mengembalikan produktivitas tanah dengan didukung faktor lingkungan disekitarnya (Lavelle & Spain, 2005).

(Brussaard et al., 2007), menjelaskan bahwa keberadaan dan aktivitas organisme tanah dapat meningkatkan aerasi, infiltrasi air, agregasi tanah serta mendistribusikan bahan organik tanah sehingga diperlukan suatu upaya untuk meningkatkan keanekaragaman organisme tanah. Keanekaragaman organisme tanah berkaitan erat dengan bahan organik tanaman yang ditambahkan pada tanah.

Tahun 2010, PBB telah menetapkan sebagai tahun keanekaragaman hayati atau *“International Year of Biodiversity”*. Penetapan ini didasari agar efisiensi dalam memanfaatkan sumber daya lokal yang ada dan tidak merusak lingkungan. Pengembangan komoditas lokal yang telah beradaptasi dengan habitat disekitarnya akan efektif dalam mengeksploitasi sumber daya dan murah dalam pengelolaannya.



Gambar 3. 2. Aktifitas organisme tanah pada Areal rhizosfer.

(<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-soil-biota-84078125/>).

Fungsinya yang paling penting organisme tanah adalah pengaturan transformasi biogeokimia di antaranya; 1) pembentukan dan pergantian bahan organik tanah (OM) yang mencakup mineralisasi dan penyerapan carbon, 2) siklus unsur hara, 3) penularan dan pencegahan penyakit, 4) degradasi polutan, dan 5) perbaikan struktur tanah (Gupta dkk. 1997). Praktik pengelolaan tanah seperti pemupukan N dan pengolahan tanah dapat merangsang aktivitas mikroba tertentu seperti nitrifikasi, denitrifikasi, dan mineralisasi yang mengatur emisi Gas Rumah Kaca melalui oksidasi dan reduksi carbon dan nitrogen.

Kemampuan organisme untuk mendaur ulang carbon dapat memberikan manfaat kesehatan tidak langsung bagi tanaman. Tanah yang mengandung bahan organik dan biomassa organisme dalam jumlah besar cenderung memiliki tingkat aktivitas organisme yang lebih tinggi dengan demikian, beberapa organisme mungkin memiliki kemampuan untuk bersaing dengan organisme lain termasuk patogen tanaman. Tanah yang mengandung bahan organik tingkat tinggi juga dapat mendukung organisme antagonis tertentu yang mempunyai cara jelas untuk menekan patogen seperti produksi antibiotik.

Mikroorganisme juga berinteraksi langsung dengan tanaman melalui hubungan simbiosis yang menyediakan nutrisi bagi tanaman sekaligus memasok carbon ke organisme. Contoh hubungan simbiosis antara organisme tanah dan tumbuhan tingkat tinggi adalah interaksi bakteri yang disebut rhizobium yang menginduksi pembentukan bintil-bintil pada akar tanaman kacang-kacangan yang mampu mengikat N untuk kebutuhan tanaman.

3.3 Bahan Organik Tanah

Bahan organik tanah dapat dibagi menjadi dua yaitu bahan organik hidup dan bahan organik tak hidup. Bahan organik hidup termasuk akar tanaman, dan organisme (makro, meso dan mikro fauna) (Lavelle & Spain, 2005). Bahan organik tak hidup merupakan materi organik didalam tanah termasuk biocar, jaringan tanaman mati dan jasad renik organisme yang mengalami perombakan secara terus menerus (Hussain et al., 2023).

Biomassa organik dapat pula diartikan sebagai material organik hidup yang berada di dalam sel makhluk hidup yang terdapat di dalam tanah seperti bakteri, fungi, algae dan protoza.

Biomassa organisme berperan penting dalam siklus. Organisme memainkan dua peranan penting didalam tanah, yaitu: 1) sebagai agen mikroba yang memainkan perannya sebaga pendekomposer residu tanaman yang dapat melepaskan hara dan CO₂. 2) Organisme sebagai sumber hara (labile pool of nutrients) seperti bakteri pelarut fosfan dan bakteri penambat nitrogen. Total biomassa karbon organisme mencapai 2% dari total karbon yang terdapat di dalam tanah (Hussain et al., 2023).

Bahan organik tanah dan khususnya karbon organik tanah diketahui memainkan peran penting dalam pemeliharaan serta perbaikan sifat fisik tanah. Dengan adanya bahan organik dalam tanah akan berdampak kepada perbaikan sifat fisik seperti porositas, kemampuan kapasitas menahan air, sruktur dan tekstur serta sifat kimia seperti kemampuan suplai hara, perbaikan pH dan KTK. Umumnya, peningkatan bahan organik tanah dipandang sebagai hal yang diinginkan oleh banyak petani, karena dapat memberikan dampak yang berhubungan langsung dengan ketersediaan nutrisi tanaman. Selain itu bahan organik sebagai bahan untuk penetrasi dan persiapan persemaian, stabilitas agregat yang lebih baik, penurunan kepadatan kepadatan tanah yang disebabkan curah, peningkatan kapasitas menahan air, peningkatan SOM. Status bahan organik dalam tanah bisa sebagai indikator dalam menilai kualitas tanah dan keberlanjutan penggunaan lahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Maliki, S., Al-Taey, D. K. A., & Al-Mammori, H. Z. (2021). Earthworms and eco-consequences: Considerations to soil biological indicators and plant function: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 41(6), 512–523. doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.02.003
- Anggiani, A. A. Y., Meitini W. P., I. K. Muksin., & I. Narayani. (2021). 75864-241-248995-1-10-20211221. *Biologi Udayana*, 25(2), 111–121.
- Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511. doi.org/10.1038/nature13855
- Bellini, B. C., Weiner, W. M., & Winck, B. R. (2023). Systematics, Ecology and Taxonomy of Collembola: Introduction to the Special Issue. *Diversity*, 15(2), 221. doi.org/10.3390/d15020221
- Bjørnlund, L., & Rønn, R. (2008). ‘David and Goliath’ of the soil food web-Flagellates that kill nematodes. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(8), 2032–2039. doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.04.011
- Blanco-Pérez, R., Sáenz-Romo, M. G., Vicente-Díez, I., Ibáñez-Pascual, S., Martínez-Villar, E., Marco-Mancebón, V. S., Pérez-Moreno, I., & Campos-Herrera, R. (2020). Impact of vineyard ground cover management on the occurrence and activity of entomopathogenic nematodes and associated soil organisms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107028

- Bonato Asato, A. E., Wirth, C., Eisenhauer, N., & Hines, J. (2023). On the phenology of soil organisms: Current knowledge and future steps. In *Ecology and Evolution* (Vol. 13, Issue 4). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/ece3.10022>
- Brussaard, L., de Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(3), 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013>
- Coleman, D. C., D. A. Crossley, Jr., & Paul F. Hendrix. (2004). *Second Edition Fundamentals of Soil Ecology*.
- Coleman, D. C., Callaham, M. A., & Crossley, D. A. (2018). Secondary Production. In *Fundamentals of Soil Ecology* (pp. 47–76). Elsevier. doi.org/10.1016/b978-0-12-805251-8.00003-x
- Coleman, D. C., & Whitman, W. B. (2005). Linking species richness, biodiversity and ecosystem function in soil systems. *Pedobiologia*, 49(6), 479–497. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.05.006>
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Gioia, C., Measey, G. J., & Lavelle, P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, S23–S38. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.001>
- Dev, M., & Chakrawarti, N. (2022). *The Living Soil: Fundamentals of Soil Biology*. www.researchgate.net/publication/369169601
- Galli, E. (2017). *Earthworms, soil fertility and plant productivity*. <https://www.researchgate.net/publication/284692169>

- Gayan, A., Borah, P., Nath, D., & Katak, R. (2023). Soil microbial diversity, soil health and agricultural sustainability. In *Sustainable Agriculture and the Environment* (pp. 107–126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00006-3>
- Guo, R., Yao, Y., Zhang, Z., Hong, C., Zhu, F., Hong, L., & Zhu, W. (2024). Body size: A hidden trait of the organisms that influences the distribution of antibiotic resistance genes in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 472, 134474. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134474>
- Harahap, R. R., Wahyuni, S., & Putri, D. R. (2021). Rancang Bangun Sistem Pendukung Keputusan Penilaian Kesehatan Tanah pada Tanaman Jagung dengan Metode Simple Additive Weighting Berbasis Desktop. In *Journal of Science and Social Research* (Issue 3). <http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR>
- Hussain, A., Bashir, H., Zafar, S., Rehman, R., Khalid, M., Awais, M., Sadiq, M., & Amjad, I. (2023). The Importance of Soil Organic Matter (Som) On Soil Productivity and Plant GROWTH. *Biological and Agricultural Sciences Research Journal*, 2023(1), 11. <https://doi.org/10.54112/basrj.v2023i1.11>
- Indriyani, Y. A. (2018). *Bakteri Tanah dan Perannya terhadap Sifat Fisik-Kimia (Koloid) Tanah*. <https://www.researchgate.net/publication/342492814>
- Isabwe, A., Yao, H., Zhang, S., Jiang, Y., Breed, M. F., & Sun, X. (2022). Spatial assortment of soil organisms supports the size-plasticity hypothesis. *ISME Communications*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s43705-022-00185-6>
- Lavelle, P., & Spain, A. V. (2005). *Soil Ecology*. Springer.

- Liu, X., Zhang, X., Tian, Y., Li, Y., Du, X., Liu, H., Steinberger, Y., & Liang, W. (2023). Microfauna community assembly and cascading relationship with microflora in cropland ecosystems along a latitudinal gradient. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 357, 108678. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108678>
- Luan, L., Jiang, Y., Cheng, M., Dini-Andreote, F., Sui, Y., Xu, Q., Geisen, S., & Sun, B. (2020). Organism body size structures the soil microbial and nematode community assembly at a continental and global scale. *Nature Communications*, 11(1), 6406. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20271-4>
- Negassa, W., & Sileshi, G. W. (2018). Integrated soil fertility management reduces termite damage to crops on degraded soils in western Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.023>
- Rochimi Setiawati, M., Suryatmana dan Tualar Simarmata, P., & Raya Bandung Sumedang Km, J. (2020). *Keragaman Mikroflora, Mikrofauna, Kandungan C-organik, dan Total N Tanah Sawah Akibat Aplikasi Azolla dan Pupuk Hayati* (Vol. 18, Issue 1).
- Rogers, D. C., Fredes, N. A., Martínez, P. A., Ferretti, N., Pompozzi, G., Pepato, A. R., & da Silva Conceição, P. H. (2020). Phylum Arthropoda: Introduction and Arachnida. In *Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates* (pp. 523–559). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804225-0.00016-2>

- Sanghaw, R., Vityakon, P., & Rasche, F. (2023). How feedback loops between meso- and macrofauna and organic residues contrasting in chemical quality determine decomposition dynamics in soils. *Heliyon*, 9(5), e15534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15534>
- State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities.* (2020). FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Stork, N. E. (n.d.). *How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth?* <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117>
- Talwar, H., & Chatli, A. (2018). Microflora of Soil: A Review. *International Journal of Advanced Research*, 6(10), 1502–1520. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/7960>
- Venter, P. C., Nitsche, F., & Arndt, H. (2018). The Hidden Diversity of Flagellated Protists in Soil. *Protist*, 169(3), 432–449. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2018.04.007>
- Wang, X., Chi, Y., & Song, S. (2024). Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1347745>
- Wang, Y. F., Chen, P., Wang, F. H., Han, W. X., Qiao, M., Dong, W. X., Hu, C. S., Zhu, D., Chu, H. Y., & Zhu, Y. G. (2022). The ecological clusters of soil organisms drive the ecosystem multifunctionality under long-term fertilization. *Environment International*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107133>
- Winsome, T. (2005). Fauna. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 539–548). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00132-6>

- Wolf, M. K., Wiesmeier, M., & Macholdt, J. (2023). Importance of soil fertility for climate-resilient cropping systems: The farmer's perspective. *Soil Security*, 13, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100119>
- Zhang, Z. Q. (2013). Animal biodiversity: An update of classification and diversity in 2013. In *Zootaxa* (Vol. 3703, Issue 1, pp. 5–11). <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3703.1.3>
- Zhu, G., Luan, L., Zhou, S., Dini-Andreote, F., Bahram, M., Yang, Y., Geisen, S., Zheng, J., Wang, S., & Jiang, Y. (2024). Body size mediates the functional potential of soil organisms by diversity and community assembly across soil aggregates. *Microbiological Research*, 282, 127669. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127669>
- Zulkaidhah, Z., Wardah, W., Saleh, S., Satriawan, W., Hapid, A., Wulandari, R., Wahyuni, D., Taiyeb, A., Rukmi, R., Rahmawati, R., & Hamka, H. (2022). Soil Macrofauna Diversity and Litter Decomposition Rate in the Buffer Zone of Lore Lindu Biosphere Reserve Indonesia. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 17(5), 753–760. <https://doi.org/10.18280/ijdne.170513>

BAB 4

SIKLUS UNSUR HARA

Oleh Muhammad Fahyu Sanjaya

4.1 Pendahuluan

Tanah yang memiliki produktivitas yang baik adalah fondasi dari setiap sistem pertanian yang baik dan merupakan kunci untuk menumbuhkan tanaman yang berkualitas tinggi. Hasil dari produktivitas tanah yang baik cukup untuk memberi makan hewan, manusia dan makhluk hidup lainnya. Kesuburan tanah merupakan salah satu karakteristik tanah yang penting bagi pertumbuhan tanaman. Tanaman membutuhkan nitrogen, fosfor, kalium dan nutrisi lainnya pada tingkat yang tepat untuk tumbuh dengan baik dan menghasilkan hasil yang baik (Hao et al., 2023). Tanah yang subur mempertahankan unsur hara tingkat sedang hingga tinggi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman dan produksi yang baik. Bahan organik tanah dan komposisi mineral mempengaruhi kesuburan tanah. Ketersediaan bahan organik tanah dan komposisi mineral yang cukup membantu dalam tersedianya nutrisi dalam tanah.

Siklus unsur hara adalah proses alami di mana nutrisi penting untuk pertumbuhan tanaman diserap dari tanah. Sel-sel dalam akar tanaman mengambil unsur-unsur hara dari tanah dan mengangkutnya ke bagian atas tanaman untuk digunakan dalam proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Dalir, 2023). Dalam siklus unsur hara, air tanah memainkan peran penting dalam menyediakan nutrisi bagi tanaman. Selain itu,

siklus unsur hara melibatkan interaksi antara tanah, tanaman dan mikroorganisme. Pertanian masa depan sangat bergantung pada siklus unsur hara yang efisien untuk memastikan produksi tanaman yang optimal (Ebbisa, 2022). Produktivitas tanah dapat dipertahankan dengan memperhatikan siklus unsur hara yang seimbang. Siklus unsur hara bermula dari pelapukan batuan dan mineral alami di dalam tanah (von Blanckenburg et al., 2021). Proses ini melepaskan unsur-unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium ke dalam tanah, yang kemudian tersedia untuk diserap oleh akar tanaman. Selain itu, mikroorganisme tanah juga berperan penting dalam menguraikan bahan organik dan mengubahnya menjadi nutrisi yang dapat diserap oleh tanaman (Sharma et al., 2022).

Oleh karena itu pelaku pertanian saat ini penting untuk memahami konsep daur ulang unsur hara agar dapat mengelola tanah secara berkelanjutan dan meminimalkan degradasi lahan. Dengan memahami siklus unsur hara, para pelaku pertanian dapat memilih praktik pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, seperti penggunaan pupuk organik, penanaman legum, dan rotasi tanaman. Selain itu, pemahaman yang baik tentang siklus unsur hara juga dapat membantu dalam mencegah pencemaran lingkungan akibat penggunaan pupuk dan pestisida kimia yang berlebihan. Oleh karena itu, penting bagi para pelaku pertanian untuk memperhatikan dan memahami siklus unsur hara guna menjaga produktivitas tanah dan lingkungan yang sehat.

Proses siklus unsur hara melibatkan beberapa tahap, termasuk penyerapan nutrisi oleh akar tanaman, peran mikroorganisme dalam mendaur ulang nutrisi, serta proses pengembalian nutrisi ke tanah melalui sisa tanaman dan dekomposisi bahan organik (Wang et al., 2022). Keseimbangan dari tahapan-tahapan ini penting untuk menjaga kesuburan

tanah dan keberlanjutan pertanian. Perlu pemahaman yang mendalam mengenai siklus unsur hara untuk dapat mengelola tanah dengan efisien dan berkelanjutan. Dengan pemahaman yang baik, Anda dapat menggunakan praktik pertanian yang ramah lingkungan, seperti rotasi tanaman, penggunaan pupuk hijau, dan pengelolaan sisa tanaman, untuk memastikan siklus unsur hara berjalan dengan optimal.

4.2 Siklus Karbon

Siklus karbon adalah proses penting yang mengatur distribusi karbon dalam berbagai bentuk di seluruh atmosfer bumi, lautan, dan daratan. Sumber karbon terbesar di alam berasal dari emisi karbon dioksida yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara (Jackson et al., 2017). Proses ini, yang dikenal sebagai pembakaran antropogenik, yang menjadi kontributor utama peningkatan kadar CO₂ di atmosfer dan merupakan faktor kunci perubahan iklim global (Sheng et al., 2021).

Karbon (C) di bumi dapat berasal dari komet dan asteroid yang mengandung bahan organik, proses geologi seperti sedimentasi dan pengendapan, serta aktivitas biologis seperti fotosintesis oleh tumbuhan (Chan et al., 2020; Willeit et al., 2023). Karbon di luar bumi mengandung senyawa kompleks termasuk hidrokarbon, asam organik, dan senyawa amino yang penting bagi evolusi kehidupan di Bumi (Potapov et al., 2022). “Siklus karbon” adalah perpindahan C di atmosfer, lautan, dan daratan melalui berbagai proses seperti respirasi, fotosintesis, dekomposisi, pembakaran, dan pemendapan (Jeltsch-Thömmes & Joos, 2023). Proses siklus karbon penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan stabilitas iklim global (Y. Huang et al., 2022). Siklus C terdiri dari siklus jangka panjang dan jangka

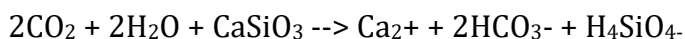
pendek. Siklus karbon jangka panjang melibatkan pertukaran karbon antara batuan, sedimen, lautan dan organisme hidup selama periode waktu yang panjang, seperti jutaan tahun (Boyce et al., 2023). Sedangkan siklus karbon jangka pendek melibatkan pertukaran karbon antara atmosfer, tumbuhan, hewan, dan tanah dalam periode waktu yang lebih pendek, seperti bulan atau tahunan (Zhou et al., 2022). Lebih jauh dibahas pada sub-bab berikut.

4.2.1 Siklus Karbon Jangka Panjang

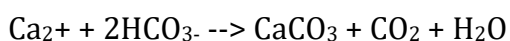
Karbon jangka panjang adalah sebuah konsep yang penting dalam memahami perubahan iklim global dan upaya untuk mengurangi emisi karbon. Siklus carbon jangka panjang mencakup semua proses alami dan antropogenik yang terlibat dalam sirkulasi karbon di atmosfer, osean, daratan, dan biosfer. Hal ini meliputi proses fotosintesis oleh tumbuhan dan fitoplankton, respirasi oleh makhluk hidup, dekomposisi bahan organik, pembakaran bahan bakar fosil, dan penyimpanan karbon dalam bentuk seperti batu bara dan minyak bumi (Frezzotti et al., 2019).

Penting untuk terus memahami siklus carbon jangka panjang agar dapat mengidentifikasi sumber-sumber emisi karbon yang dapat dikurangi dan upaya-upaya untuk meningkatkan penyerapan karbon oleh lingkungan. Dengan pemahaman yang mendalam tentang siklus carbon, kita dapat merancang kebijakan dan tindakan yang lebih efektif dalam mengurangi dampak perubahan iklim global. Degradasi termal komet dan asteroid yang memasuki atmosfer bumi diduga menjadi sumber awal karbon dioksida (CO_2) di atmosfer. Akumulasi CO_2 di atmosfer menghasilkan komponen aktif utama pertama dalam siklus C global: karbonat terlarut (CO_3). Pelapukan batuan yang mengandung kalsium (Ca) magnesium

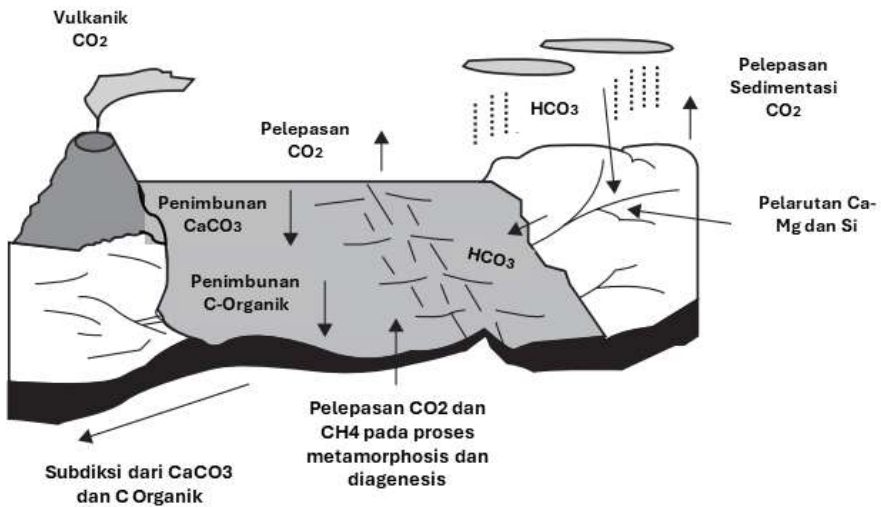
(Mg) dan silikat (Si) yang dilarutkan oleh asam karbonat (HCO_3^-) yang ditemukan dalam curah hujan dan sumber air lainnya. Berikut penjelasan reaksi kimia tersebut:



Spesies kimia ini, khususnya Ca dan karbonat, diangkut dalam keadaan terlarut melalui sungai ke laut, dimana terjadi reaksi berikut:



Karbonat yang terbentuk selama pedogenesis, disebut caliche, berukuran kecil dibandingkan dengan sedimentasi karbonat laut. Pelapukan batuan Ca-Mg, Si dan sedimentasi karbonat laut merupakan penyerap besar CO_2 di atmosfer. Pengangkatan wilayah pegunungan diperkirakan telah meningkatkan pelapukan batuan Ca-Mg, dan Si secara tidak langsung konsumsi karbon dioksida (CO_2) di atmosfer pun meningkat. Hal ini mengakibatkan pendinginan akhir pada era Kenozoikum karena menipisnya CO_2 di atmosfer (van de Wal et al., 2011). Pengangkatan orogenik yang curam terkait dengan dinamika formasi benua meningkatkan pelapukan mineral primer dengan meningkatnya kejadian erosi, yang secara konstan membuat batuan Ca-Mg dan Si terkena pelapukan lebih lanjut. Setelah batuan sedimen masuk ke dalam mantel bumi, karbonat akhirnya mengalami pelapukan termal dan dilepaskan kembali sebagai CO_2 ke atmosfer terutama melalui aktivitas gunung berapi (Gambar 4.1). Proses ini merupakan langkah penting dalam mengendalikan kandungan CO_2 di atmosfer pada awal sejarah bumi.



Gambar 4. 1. Siklus karbon jangka Panjang (Berner, 2004)

Sedangkan selama pada era Devonian, evolusi tumbuhan berpembuluh besar mengganggu siklus sedimentasi karbonat jangka panjang dengan mempercepat pelapukan batuan Si dan menghilangkan CO₂ dari atmosfer melalui penguburan bahan organik dalam sedimen. Percepatan pelapukan batuan silikat terjadi sebagai akibat dari produksi asam organik selama pertumbuhan dan dekomposisi sisa-sisa tanaman. Pertumbuhan tanaman vaskular yang subur menyebabkan akumulasi bahan organik dalam jumlah besar, yang pada akhirnya mengarah pada pembentukan cadangan bahan bakar fosil dalam jumlah besar yang sangat penting bagi masyarakat saat ini. Pada periode ini juga terjadi peningkatan oksigen atmosfer (O₂) dari aktivitas fotosintesis dan tidak adanya oksidasi bahan organik kaya C yang terkubur. Evolusi lignin yang resisten terhadap mikroba, suatu komponen dinding sel sekunder tumbuhan berpembuluh, diduga berkontribusi terhadap banyaknya sisa-sisa tumbuhan yang disimpan. Telah dihipotesiskan bahwa penguburan awal bahan tanaman lignin dalam jumlah besar terjadi sebagai akibat

dari tidak adanya organisme pengurai lignin, yang kemudian berevolusi pada zaman Paleozoikum (Nelsen et al., 2016). Hal ini mungkin menjadi alasan mengapa cadangan batubara pada periode Karbon dan Permian melebihi cadangan batubara pada periode lain dalam sejarah bumi.

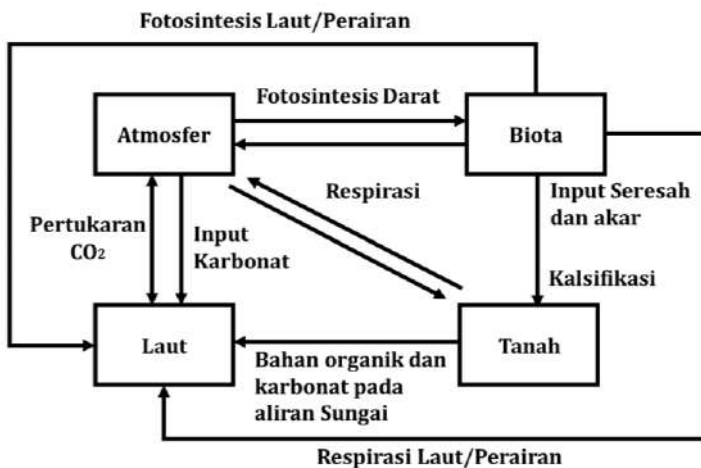
Jika digabungkan, siklus karbonat-Si dan bahan organik mendominasi pengendalian tingkat CO₂ dan O₂ jangka panjang selama jutaan tahun pada era Fanerozoikum. Siklus C yang dominan ini mungkin terjadi pada masa Prakambrium, namun catatan fosil, geologi, dan data iklim tidak sebanyak pada masa Fanerozoikum, sehingga membuat penafsiran siklus C Prakambrium menjadi lebih sulit. Pengendapan bahan organik saat ini terjadi lebih lambat dibandingkan pada masa Devonian, mungkin karena berkurangnya produksi primer dan evolusi organisme pengurai sisa-sisa tanaman (Qiu et al., 2021). Hal ini, ditambah dengan berkurangnya aktivitas gunung berapi, menunjukkan keseimbangan baru CO₂ di atmosfer yang dikendalikan oleh siklus ini.

Dalam 30.000 hingga 40.000 tahun terakhir, tingkat CO₂ sebesar 200 ppmV atau kurang adalah hal biasa. Tingkat karbon dioksida yang melebihi 1000 ppmV merupakan hal yang umum terjadi sebelum periode ini hingga 4 juta tahun sebelum era ini (Joachimski et al., 2022). Meskipun siklus ini berlangsung lama, terbukti bahwa pembakaran bahan bakar fosil dapat berdampak langsung pada siklus C yang menyebabkan percepatan perubahan siklus C pada skala global.

4.2.2 Siklus Karbon Jangka Pendek

Siklus C jangka pendek didominasi oleh interaksi fotosintesis, respirasi, dan pembentukan bahan organik di darat dan laut (Gambar 3.2). Siklus C jangka pendek bergantung pada dua gas utama, karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄).

Gangguan siklus C jangka pendek yang menyebabkan perubahan konsentrasi kedua gas tersebut di atmosfer menimbulkan potensi perubahan iklim karena keduanya merupakan gas rumah kaca. Gas-gas ini menyerap radiasi infra merah yang keluar dari permukaan bumi dan memerangkap panas. Seiring berjalannya waktu, gas-gas ini telah mengatur suhu bumi. Gas rumah kaca lain yang dihasilkan oleh mikroba seperti dinitrogen oksida juga berperan penting dalam perubahan iklim. Variasi luaran energi matahari dan perubahan jarak bumi dari matahari juga berkontribusi terhadap perubahan iklim.



Gambar 4. 2. Siklus carbon jangka pendek (Berner, 2004)

Sejak akhir tahun 1800-an, penggunaan bahan bakar fosil, pembukaan lahan hutan, dan konversi lahan alami yang luas menjadi lahan pertanian telah menyebabkan transfer bersih karbon terestrial ke atmosfer (Falkowski et al., 2000). Hal ini sebagian diimbangi oleh serapan karbonat yang terus menerus sebagai batuan sedimen di lautan. Sekitar 20% dari C yang

berevolusi dalam 100 tahun terakhir tidak dapat diperhitungkan dalam perkiraan C global saat ini. Ada dugaan bahwa potensi penyerapan C pada ekosistem terestrial telah disepelekan. Hal ini mungkin disebabkan oleh laju fotosintesis yang lebih tinggi dan efisiensi penggunaan air oleh tanaman di bawah peningkatan CO₂ di atmosfer. Area lahan budidaya yang luas dikembalikan ke pepohonan dan rumput yang mendorong penyerapan C tanah. Endapan nitrogen dari aktivitas antropogenik telah meningkatkan produksi tanaman. Peningkatan produksi padi dengan memanfaatkan sawah yang tergenang air dan peternakan telah berkontribusi terhadap peningkatan emisi CH₄ (Deng et al., 2023). Proses-proses biologis ini dikombinasikan dengan ketidakpastian besar dalam laju pelarutan Ca dan Mg dari sumber-sumber terestrial dapat menjelaskan perbedaan dalam penghitungan cadangan karbon global.

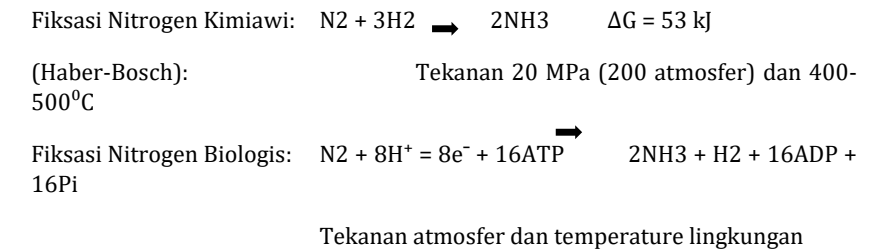
4.3 Siklus Nitrogen

Siklus nitrogen merupakan proses penting di alam yang melibatkan konversi gas nitrogen menjadi berbagai bentuk yang dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan dan hewan. Mineralisasi nitrogen berkaitan erat dengan dekomposisi, fiksasi nitrogen, nitrifikasi, dan denitrifikasi (de Bruijn & Butterbach-Bahl, 2010). Lebih jauh dibahas pada sub-bab berikut.

4.3.1. Fiksasi Nitrogen

Fiksasi nitrogen adalah proses dimana nitrogen atmosfer atau dinitrogen (N₂) diikat oleh organisme. Hal ini menghasilkan sekitar 140 Mt nitrogen per tahun dan merupakan jalur utama nitrogen yang diikat melalui proses alami memasuki biosfer, jauh melebihi fiksasi nitrogen melalui oksidasi saat proses

pelepasan petir (Barth et al., 2023; Davies-Barnard et al., 2022). Fiksasi nitrogen dilakukan secara eksklusif oleh bakteri dengan kompleks enzim nitrogenase. Di negara-negara maju, masukan nitrogen ke sistem pertanian dari fiksasi nitrogen biologis relatif kecil dibandingkan dengan nitrogen pupuk yang dihasilkan oleh Haber-Bosch yang memerlukan energi dan proses lainnya, sedangkan fiksasi nitrogen secara biologis merupakan sumber utama tambahan nitrogen di wilayah berkembang di mana harga pupuk nitrogen relatif mahal dibandingkan perekonomian di wilayah berkembang (Wen et al., 2021).



Fiksasi nitrogen secara biologis dilakukan oleh: (i) bakteri yang hidup bebas seperti kelompok genera *Bacillus*, *Klebsiella* dan *Clostridium* (Cleveland et al., 2022), (ii) bakteri dari genus *Rhizobium* dan kerabat dekatnya yang hidup bersimbiosis dalam bintil-bintil pada akar tanaman polong-polongan seperti kacang-kacangan, alfalfa (lucerne) dan semanggi, (Hossain et al., 2023) (iii) actinobacteria (actinomycetes) dalam genus *Frankia* yang mengikat nitrogen dalam bintil akar beberapa tanaman non kacang-kacangan seperti alder, cyanobacteria yang hidup bebas seperti *Nostoc* yang berfotosintesis dan hidup terus atau dekat dengan permukaan tanah, (Normand et al., 2023; Pujic et al., 2023) dan (iv) fiksasi nitrogen oleh bakteri seperti kelompok genera *Azotobacter* dan *Azospirillum* yang hidup berasosiasi dengan akar tanaman (meskipun tidak bersimbiosis), digambarkan sebagai 'fiksasi nitrogen asosiatif' (Aasfar et al.,

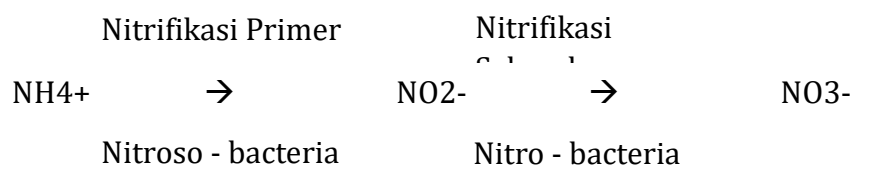
2021). Molekul N_2 sangat stabil dan reaksi untuk mereduksinya menjadi NH_4^+ yang tersedia secara biologis memerlukan sumber energi. Dalam kasus fiksasi nitrogen oleh cyanobacteria, hal ini disediakan oleh karbon organik dari fotosintesis, dan dalam kasus bakteri lain dari substrat organik dalam interaksi tanah-tanaman. Pemfiksasi nitrogen simbiosis menerima karbon organik dari tanaman dan pengikat nitrogen asosiatif menerima sejumlah karbon organik dari rhizodeposit (Baptist et al., 2015).

4.3.2. Nitrifikasi

Nitrifikasi adalah oksidasi NH_4^+ menjadi NO_3^- yang dilakukan terutama oleh bakteri kemoautotrofik dalam kondisi oksik yang menggabungkan daya reduksi oksidasi dengan reduksi karbon dioksida dari atmosfer menjadi karbon organik (Proctor et al., 2023). Reaksi biasanya terjadi dalam dua tahap yang dilakukan oleh genera bakteri nitrifikasi yang berbeda, namun karena tingginya aktivitas organisme yang melakukan tahap kedua terhadap nitrit (NO_2^-), yaitu zat yang jarang terakumulasi. Hal ini dikarenakan hasil energi dari oksidasi NH_4^+ atau NO_2^- sangat kecil, dimana kondisi lingkungan memungkinkan (pH oksik dan mendekati netral) dan terdapat organisme yang berkaitan, ion amonium bebas jarang bertahan di dalam tanah dan dengan cepat teroksidasi menjadi ion nitrat oleh nitrifier kemoautotrofik dimana amonium merupakan satu-satunya sumber energi.

Nitrifikasi kemoautotrofik terbatas pada beberapa genera bakteri, disebut genera nitroso, Nitrosomonas, Nitrosovibrio, Nitrosolobus dan Nitrosococcus melakukan oksidasi amonium menjadi nitrit (Kikuchi et al., 2023). Selanjutnya bakteri nitro, Nitrobacter, Nitrospira, Nitrococcus dan Nitrospina melakukan oksidasi nitrit menjadi nitrat (Spieck et al., 2021). Selain itu terdapat banyak bukti bahwa jamur juga dapat mengoksidasi

amonium, namun hal ini diyakini terbatas pada tanah hutan yang bersifat asam (Wu et al., 2017).

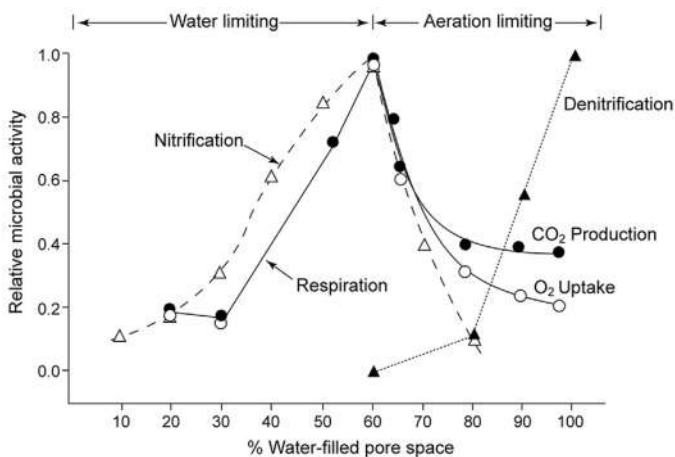


Nitrifikasi tidak secara langsung mempengaruhi ketersediaan nitrogen bagi tanaman, karena sebagian besar tanaman mampu menyerap NH_4^+ atau NO_3^- , namun nitrifikasi secara tidak langsung mempengaruhi pasokan nitrogen ke tanaman karena hal ini merupakan predisposisi hilangnya nitrogen dari tanah (Li et al., 2022). Nitrat merupakan anion sehingga sulit ditahan pada tempat pertukaran dalam tanah dibandingkan dengan kationik NH_4^+ ; oleh karena itu nitrifikasi merupakan predisposisi hilangnya nitrogen melalui proses pencucian. Nitrat adalah titik awal denitrifikasi, nitrifikasi dapat mendorong denitrifikasi meskipun kedua proses tersebut didorong oleh kondisi lingkungan yang berbeda. Dimana denitrifikasi adalah proses anoksik sedangkan nitrifikasi adalah proses oksik (Leong et al., 2023). Hal ini dapat terjadi karena nitrat dapat diproduksi di situs mikro oksik di dalam tanah dan, karena bersifat mobile, berdifusi ke situs mikro anoksik (Lee et al., 2017). Selain itu, ia dapat diproduksi dalam kondisi oksik melalui nitrifikasi dan direduksi melalui denitrifikasi ketika kondisi lingkungan menjadi anoksik. Potensi untuk mengelola nitrifikasi dalam tanah terdapat manipulasi amonium seperti diuraikan di atas atau dengan menggunakan inhibitor nitrifikasi. Namun, penghambat nitrifikasi belum digunakan secara luas karena biayanya yang mahal, dan fakta bahwa penghambat

nitrifikasi seringkali tidak dapat diandalkan karena tidak selalu dapat diterapkan pada lokasi yang tepat di dalam tanah di mana nitrifikasi terjadi.

4.3.3 Denitrifikasi

Denitrifikasi adalah reduksi nitrat tanah menjadi gas N, NO, N₂O, dan N₂ (Highton et al., 2022). Berbagai macam bakteri yang sebagian besar heterotrofik dapat melakukan denitrifikasi, dimana mereka menggunakan NO₃ daripada oksigen (O₂) sebagai akseptor elektron terminal selama respirasi (Kellermann et al., 2022). Karena nitrat merupakan akseptor elektron yang kurang efisien dibandingkan O₂, sebagian besar denitrifikasi melakukan denitrifikasi hanya jika O₂ tidak tersedia (Schlüter et al., 2019). Pada sebagian besar tanah, hal ini terjadi terutama setelah curah hujan karena pori-pori tanah menjadi jenuh air dan difusi O₂ ke site mikro melambat secara drastis. Biasanya denitrifikasi mulai terjadi pada ruang pori berisi air dengan konsentrasi 60% atau lebih tinggi (Gambar 3.3.).



Gambar 4. 3. Hubungan antara ruang pori tanah berisi air dan aktivitas relatif mikroba terhadap siklus N (Linn & Doran, 1984)

Di lahan basah dan lahan sawah, difusi mungkin terbatas pada sebagian besar waktu. Kebutuhan oksigen juga dapat melebihi pasokan di dalam agregat tanah dan sampah yang membusuk dengan cepat. Denitrifikasi adalah satu-satunya titik dalam siklus N di mana N tetap masuk kembali ke atmosfer sebagai N_2 ; berfungsi untuk menutup siklus N global. Denitrifikasi penting sebagai sumber utama N_2O di atmosfer, gas rumah kaca penting yang juga mengonsumsi ozon stratosfer. Dari sudut pandang pengelolaan, denitrifikasi bermanfaat jika diinginkan untuk menghilangkan kelebihan NO_3 dari tanah sebelum ditransfer ke air tanah atau air permukaan. Pengolahan limbah seringkali bertujuan untuk menghilangkan N dari aliran limbah dengan mengelola nitrifikasi dan denitrifikasi. Biasanya air limbah dialirkan melalui tangki sedimentasi, filter, dan lapisan pasir yang dirancang untuk menghilangkan partikulat dan mendorong dekomposisi dan mineralisasi N organik menjadi NH_4 , yang kemudian dinitrifikasi dalam kondisi aerobik menjadi NO_3 . Aliran tersebut kemudian diarahkan ke tangki anaerobik dimana denitrifier mengubah NO_3 menjadi N_2O dan N_2 , yang kemudian dilepaskan ke atmosfer (Suri et al., 2021). Bagian dari tantangan pengelolaan nitrifikasi/denitrifikasi adalah memastikan bahwa aliran sungai terkena kondisi aerobik cukup lama sehingga memungkinkan nitrifier mengubah sebagian besar NH_4 menjadi NO_3 namun tidak terlalu lama untuk menghilangkan seluruh C organik terlarut (dikenal sebagai kebutuhan oksigen biologis atau BOD kepada pereayasa air limbah), yang dibutuhkan oleh denitrifier untuk substrat.

Denitrifikasi juga dapat menghilangkan nitrat dari air tanah sebelum dipindahkan ke sungai (Hurtado-Martinez et al., 2021). Di sebagian besar lahan basah dan daerah tepi sungai, air tanah yang kaya akan nitrat harus mengalir melintasi antarmuka air tanah-sedimen yang biasanya bersifat anaerobik dan kaya karbon. Saat nitrat bergerak melintasi badan air, nitrat dapat

didenitrifikasi menjadi N_2O dan N_2 , sehingga menjaganya agar tidak mencemari air permukaan hilir (Moloantoa et al., 2022). Dalam ekosistem yang dikelola, biasanya diinginkan untuk meminimalkan denitrifikasi guna melestarikan N lebih lanjut untuk serapan tanaman; di wilayah dengan curah hujan tinggi, kehilangan N akibat denitrifikasi dapat menyaingi atau melampaui kehilangan N akibat pencucian nitrat (Fang et al., 2015). Tidak ada teknologi yang dirancang untuk menghambat denitrifikasi; biasanya denitrifier paling baik dikelola secara tidak langsung dengan memanipulasi ketinggian air (misalnya, dalam budidaya padi) atau pasokan nitrat (misalnya, penghambat nitrifikasi).

4.4 Siklus Posfat

Nutrisi tanaman penting selain Nitrogen dan carbon ialah posfor. Posfor adalah salah satu unsur hara penting untuk kesuburan tanah. Posfor berperan dalam proses pertumbuhan tanaman, terutama dalam pembentukan akar, biji, dan buah (Solangi et al., 2023). Kekurangan posfor dalam tanah dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta mengurangi hasil panen. Sumber posfor untuk kesuburan tanah dapat berasal dari pupuk fosfat alami seperti batuan fosfat, fosfat guano, dan pupuk posfat sintetis. Abad 20 pupuk posfat sintetis seperti superphosphate dan triple superphosphate telah banyak digunakan dalam praktek pertanian untuk meningkatkan kandungan posfor dalam tanah. Lebih dari 50% dari pupuk yang diproduksi di seluruh dunia adalah pupuk fosfat (Guelfi et al., 2022). Siklus posfat dalam ekosistem tanah melibatkan pengikisan batuan fosfat, penyerapan oleh tumbuhan, dan kembali ke tanah melalui sisa-sisa organik.

4.4.1 Bentuk Fosfor

Kandungan P tanah berkisar antara 500 hingga 2.500 kg/ha, dimana 15-70 persennya mungkin terdapat dalam bentuk anorganik yang sangat terserap atau tidak dapat larut, sisanya berupa P organik yang merupakan sumber utama P bagi mikroorganisme tanah dan mesofauna (Nunes et al., 2020). Fosfat asam nukleat dan nukleotida dengan cepat termineralisasi, tetapi ketika rasio C:P naik di atas c. 100, P diimobilisasi oleh mikroorganisme, terutama bakteri yang mempunyai kebutuhan P yang relatif tinggi sebesar 1,5-2,5 persen P berat kering dibandingkan dengan 0,05-0,5 untuk tanaman (Vadstein et al., 1988). Residu fosfat bakteri terutama terdiri dari garam Ca, Fe, dan Al yang tidak larut dari inositol heksafosfat, yang disebut fitat (García-López et al., 2021; Suzuki et al., 2010). Jadi, dalam ekosistem terestrial dengan input P yang tidak signifikan, organisme tanah sangat kompetitif dengan tanaman tingkat tinggi untuk mendapatkan P (Sabais et al., 2012).

Mikroorganisme tidak hanya memineralisasi P organik tetapi beberapa kelompok mengeluarkan asam organik, seperti asam α -ketoglukonat, yang menginvasi Ca fosfat yang tidak larut dan melepaskan fosfat (Rawat et al., 2021; Zhu & He, 2023). Beberapa spesies *Aspergillus*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas* dan *Achromobacter*, yang melimpah di rizosfer tumbuhan, memiliki kemampuan ini (Abbasi, 2023). Namun, sebagian besar P diserap oleh mikroorganisme itu sendiri dalam lingkungan rizosfer yang sangat kompetitif.

4.4.2 Ketersediaan Fosfat

Ortofosfat (H_2PO_4^- , dan HPO_4^{2-}) yang dilepaskan melalui mineralisasi dengan cepat diserap oleh partikel tanah dan ketersediaannya terus menurun seiring berjalannya waktu,

proses ini yang disebut '*fiksasi*' fosfat (Müller & Bünemann, 2014). Fosfat pada permukaan yang mudah terdesorpsi, ditambah fosfat dalam larutan, disebut P labil untuk membedakannya dengan P yang terdapat dalam senyawa tidak larut atau bahan organik, yang bersifat non-labil (Song et al., 2023). Transformasi antara berbagai bentuk P dalam tanah ditunjukkan pada Gambar 3.4.

pH tanah, kandungan liat dan seskuioksida serta Al^{3+} yang dapat ditukar semuanya mempengaruhi ketersediaan P. Jika pengaruh oksida Fe dan Al bebas lebih dominan, atau pada tanah masam yang dipupuk dimana senyawa dengan komposisi FePO_4 , $n\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{AlPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ada dan larut secara tidak selaras sehingga melepaskan lebih banyak P daripada Fe atau Al, P dalam larutan tanah meningkat seiring kenaikan pH (Mayakaduwege et al., 2021). Sebaliknya, pada tanah basa dan berkapur yang dipupuk dengan P, Ca fosfat yang tidak larut seperti hidroksiapatit dan oktakalsium fosfat yang sebagian besar P tidak labil, dan kelarutan senyawa-senyawa ini meningkat seiring dengan turunnya pH (Amin, 2023). Akibatnya, ketersediaan P pada tanah tersebut paling besar antara pH 6 dan pH 7.

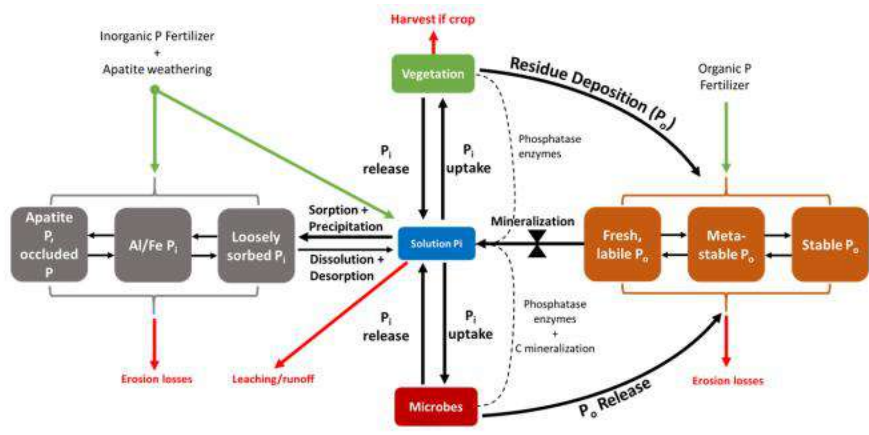
Namun, tanah masam dengan status P rendah yang mempertahankan kelebihan mineral lempung relatif terhadap seskuioksida menunjukkan tren sebaliknya dalam ketersediaan P seiring dengan perubahan pH. Antara pH 4,5 dan 7, hidrolisis Al^{3+} yang dapat ditukar membentuk ion hidroksialuminium yang bertindak sebagai tempat adsorpsi P karena sisa muatan positifnya (X. Huang et al., 2009). Ion-ion ini juga mudah terpolimerisasi sehingga kompleks hidroksi-aluminium dengan ion H_2PO_4^- yang teroklusi dalam strukturnya terbentuk pada permukaan mineral lempung, menghasilkan konsentrasi P minimum pada kisaran pH 5-6,5. Di atas pH 7, Al mulai larut

seiring dengan pelepasan anion aluminat dan P (Liang et al., 2010).

4.4.3 Proses Siklus Fosfat

Dalam interaksi tanah dan tanaman, P terdapat dalam bentuk anorganik (P_i) dan organik (P_o) (Gambar 2.4.), yang kelimpahan relatifnya bergantung pada kondisi edafik, pengelolaan, dan iklim. Secara umum, P_o menyumbang 35%–65%, dan terkadang mencapai 90 %, dari total P dalam tanah (Pavinato et al., 2022; Williams & Steinbergs, 1958). Dari total P di sebagian besar interaksi tanaman dan tanah, kurang dari 10% terdapat pada organisme hidup (Arai & Sparks, 2007; Kull et al., 2023). Biasanya, kurang dari 1% berada dalam larutan sebagai spesies organik terlarut atau sebagai ion fosfat anorganik bebas (PO_4) yang dapat segera digunakan oleh tanaman dan mikroorganisme (Frossard et al., 2000; Moorlegghem et al., 2011). Agar PO_4 tersedia dalam larutan tanah untuk penyerapan organisme, P_i tanah dan P_o tanah harus mengalami transformasi abiotik dan biotik. P_i tanah berada dalam bentuk mineral primer, diendapkan sebagai fosfat anorganik (terutama sebagai $AlPO_4$, $FePO_4$, dan $CaPO_4$), tersumbat oleh endapan dan mineral lainnya, diserap ke permukaan mineral, atau dilarutkan dalam larutan tanah. Dalam jalur fisiokimia anorganik, PO_4 dilepaskan ke dalam larutan melalui pelarutan mineral, endapan, dan P_i yang diserap (Arai & Sparks, 2007). Namun, kesetimbangan PO_4 lebih menyukai penyerapan ke fase padat daripada desorpsi (Menezes-Blackburn et al., 2016). PO_4 mengalami penyerapan pada permukaan mineral dan koloid melalui interaksi elektrostatis atau kemisorpsi cepat yakni pertukaran ligan di lokasi mineral eksternal.

Setelah PO_4 diserap, PO_4 akan diserap kembali ke dalam larutan tanah atau distabilkan melalui pertukaran ligan lebih lanjut dan penggabungan secara perlahan ke dalam agregat atau lempung (Agbenin & Tiessen, 1995; Arai & Sparks, 2007). Metode Hedley et al., (1982), kemudian disempurnakan oleh Tiessen & Moir, (1993), mencoba untuk mengukur P ke dalam kumpulan sepanjang kontinum stabilisasi P menggunakan metode ekstraksi kimia berurutan. Fraksinasi Hedley adalah metode yang paling banyak digunakan untuk mengukur P_i dan P_o dalam fraksi dengan berbagai labilitas dan, secara tidak langsung, ketersediaan tanaman (Cao et al., 2022).



Gambar 4. 4. Siklus posfor di alam (McConnell et al., 2020)

Pelarutan P_i fase padat, dan ketersediaan tanaman, bergantung pada tipe ekosistem (Cleveland et al., 2013), derajat perkembangan tanah (Smeck, 1985), bahan induk (Bünemann et al., 2016), labilitas P_i relatif terhadap P_o (Pistocchi et al., 2018), dan aktivitas manusia (Oehl et al., 2004). Tanah pada tahap awal perkembangan mempunyai kadar P_o tanah yang rendah, sehingga perolehan P oleh tanaman bergantung pada proses fisiokimia untuk melarutkan P_i . Proses fisiokimia ini juga

cenderung mengontrol ketersediaan P bagi tanaman di agroekosistem yang disuplai dengan pupuk kaya Pi (Bünemann, 2015; Guo et al., 2000; Oehl et al., 2004). Walaupun peranan Po tidak terlalu penting dalam sistem pertanian, namun Po dapat menjadi sumber P yang penting melalui mineralisasi di tanah berhutan atau tanah yang mengalami cuaca buruk (Bünemann, 2015; Cleveland et al., 2013; Yang & Post, 2011), terutama ketika ketersediaan Pi labil yang rendah (Pistocchi et al., 2018).

Bentuk Po tanah yang paling umum adalah monoester ortofosfat, diester ortofosfat, polifosfat organik, dan fosfonat (Richardson et al., 2022). Monoester ortofosfat inositol fosfat mengandung sebagian kecil Po total di sebagian besar tanah yang diukur, terutama karena sifatnya yang tidak tahan terhadap mineralisasi (Dou et al., 2009). Monoester gula fosfat dan diester fosfat seperti DNA dan RNA merupakan sumber Po yang dapat termineralisasi lebih labil (Turner, 2008).

Agen yang bertanggung jawab atas mineralisasi Po adalah fosfatase tanaman dan mikroba yang bersifat periplasma, terikat membran, atau dikeluarkan ke dalam larutan tanah. Salah satu fungsi enzim ekstraseluler adalah mendepolimerisasi senyawa Po, sehingga meningkatkan kelarutan dan aksesibilitasnya oleh mikroba dan tanaman (Liu et al., 2022). Setelah depolimerisasi, monomer Po dapat diasimilasi oleh mikroorganisme, bergantung pada protein transpor membran spesifik senyawa dan kontrol organisme dan lingkungan lainnya seperti konsentrasi Pi atau senyawa Po (Segura et al., 1999; Yu et al., 2023). Namun, hanya sedikit senyawa Po yang diketahui memiliki mobilitas transmembran langsung. Penyerapan PO_4 secara tidak langsung dari senyawa Po yang tidak dapat diangkut diatur oleh enzim fosfatase.

DAFTAR PUSTAKA

- Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. (2021). Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
- Abbasi, S. (2023). Plant-microbe interactions ameliorate phosphate-mediated responses in the rhizosphere: a review. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1074279>
- Agbenin, J. O., & Tiessen, H. (1995). Phosphorus Sorption at Field Capacity and Soil Ionic Strength: Kinetics and Transformation. *Soil Science Society of America Journal*, 59(4), 998–1005. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900040006x>
- Amin, A. E.-E. A. Z. (2023). Chemical Properties of Some Alkaline Sandy Soils and Their Effects on Phosphorus Dynamics with Bone Char Application as a Renewable Resource of Phosphate Fertilizer. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 1589–1598. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01199-2>
- Arai, Y., & Sparks, D. L. (2007). *Phosphate Reaction Dynamics in Soils and Soil Components: A Multiscale Approach* (pp. 135–179). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94003-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94003-6)

- Baptist, F., Aranjuelo, I., Legay, N., Lopez-Sangil, L., Molero, G., Rovira, P., & Nogués, S. (2015). Rhizodeposition of organic carbon by plants with contrasting traits for resource acquisition: responses to different fertility regimes. *Plant and Soil*, 394(1-2), 391-406. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2531-4>
- Barth, P., Stüeken, E. E., Helling, C., Rossmanith, L., Peng, Y., Walters, W., & Claire, M. (2023). Isotopic constraints on lightning as a source of fixed nitrogen in Earth's early biosphere. *Nature Geoscience*, 16(6), 478-484. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01187-2>
- Berner, R. A. (2004). *The Phanerozoic Carbon Cycle*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195173338.001.0001>
- Boyce, C. K., Ibarra, D. E., & D'Antonio, M. P. (2023). What we talk about when we talk about the long-term carbon cycle. *New Phytologist*, 237(5), 1550-1557. <https://doi.org/10.1111/nph.18665>
- Bünemann, E. K. (2015). Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 82-98. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026>
- Bünemann, E. K., Augstburger, S., & Frossard, E. (2016). Dominance of either physicochemical or biological phosphorus cycling processes in temperate forest soils of contrasting phosphate availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 101, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.005>

- Cao, Z., Kühn, P., He, J.-S., Bauhus, J., Guan, Z.-H., & Scholten, T. (2022). Calibration of Near-Infrared Spectra for Phosphorus Fractions in Grassland Soils on the Tibetan Plateau. *Agronomy*, 12(4), 783. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040783>
- Chan, Q. H. S., Franchi, I. A., Zhao, X., Stephant, A., Wright, I. P., & Alexander, C. M. O. (2020). Organics preserved in anhydrous interplanetary dust particles: Pristine or not? *Meteoritics & Planetary Science*, 55(6), 1320–1348. <https://doi.org/10.1111/maps.13414>
- Cleveland, C. C., Houlton, B. Z., Smith, W. K., Marklein, A. R., Reed, S. C., Parton, W., Del Grosso, S. J., & Running, S. W. (2013). Patterns of new versus recycled primary production in the terrestrial biosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12733–12737. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302768110>
- Cleveland, C. C., Reis, C. R. G., Perakis, S. S., Dynarski, K. A., Batterman, S. A., Crews, T. E., Gei, M., Gundale, M. J., Menge, D. N. L., Peoples, M. B., Reed, S. C., Salmon, V. G., Soper, F. M., Taylor, B. N., Turner, M. G., & Wurzburger, N. (2022). Exploring the Role of Cryptic Nitrogen Fixers in Terrestrial Ecosystems: A Frontier in Nitrogen Cycling Research. *Ecosystems*, 25(8), 1653–1669. <https://doi.org/10.1007/s10021-022-00804-2>
- Dalir, N. (2023). Nutrients Uptake and Transport in Plants. In *Plant Ionomics* (pp. 180–190). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119803041.ch10>

- Davies-Barnard, T., Zaehle, S., & Friedlingstein, P. (2022). Assessment of the impacts of biological nitrogen fixation structural uncertainty in CMIP6 earth system models. *Biogeosciences*, 19(14), 3491–3503. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3491-2022>
- de Bruijn, A. M. G., & Butterbach-Bahl, K. (2010). Linking carbon and nitrogen mineralization with microbial responses to substrate availability — the DECONIT model. *Plant and Soil*, 328(1–2), 271–290. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0108-9>
- Deng, O., Ran, J., Gao, X., Lin, X., Lan, T., Luo, L., Xiong, Y., Liu, J., Ou, D., Fei, J., & Huang, R. (2023). CH₄ and CO₂ emissions in water networks of rice cultivation regions. *Environmental Research*, 218, 115041. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115041>
- Dou, Z., Ramberg, C. F., Toth, J. D., Wang, Y., Sharpley, A. N., Boyd, S. E., Chen, C. R., Williams, D., & Xu, Z. H. (2009). Phosphorus Speciation and Sorption-Desorption Characteristics in Heavily Manured Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 73(1), 93–101. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0416>
- Ebbisa, A. (2022). Toward the Recent Advances in Nutrient Use Efficiency (NUE): Strategies to Improve Phosphorus Availability to Plants. In *Sustainable Crop Production - Recent Advances*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102595>

- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Högberg, P., Linder, S., Mackenzie, F. T., Moore III, B., Pedersen, T., Rosenthal, Y., Seitzinger, S., Smetacek, V., & Steffen, W. (2000). The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science*, 290(5490), 291–296. <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>
- Fang, Y., Koba, K., Makabe, A., Takahashi, C., Zhu, W., Hayashi, T., Hokari, A. A., Urakawa, R., Bai, E., Houlton, B. Z., Xi, D., Zhang, S., Matsushita, K., Tu, Y., Liu, D., Zhu, F., Wang, Z., Zhou, G., Chen, D., ... Yoh, M. (2015). Microbial denitrification dominates nitrate losses from forest ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(5), 1470–1474. <https://doi.org/10.1073/pnas.1416776112>
- Frezzotti, M. L., Villa, I. M., & Iannantuoni, G. (2019). Introduction to the Thematic set: Carbon forms, paths and processes in the Earth. *Journal of the Geological Society*, 176(2), 335–336. <https://doi.org/10.1144/jgs2019-016>
- Frossard, E., Condon, L. M., Oberson, A., Sinaj, S., & Fardeau, J. C. (2000). Processes Governing Phosphorus Availability in Temperate Soils. *Journal of Environmental Quality*, 29(1), 15–23. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900010003x>
- García-López, A. M., Recena, R., & Delgado, A. (2021). The adsorbent capacity of growing media does not constrain myo-inositol hexakisphosphate hydrolysis but its use as a phosphorus source by plants. *Plant and Soil*, 459(1–2), 277–288. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04764-1>

- Guelfi, D., Nunes, A. P. P., Sarkis, L. F., & Oliveira, D. P. (2022). Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. *Sustainability*, 14(21), 14266. <https://doi.org/10.3390/su142114266>
- Guo, F., Yost, R. S., Hue, N. V., Evensen, C. I., & Silva, J. A. (2000). Changes in Phosphorus Fractions in Soils under Intensive Plant Growth. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5), 1681–1689. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451681x>
- Hao, D., Li, X., Kong, W., Chen, R., Liu, J., Guo, H., & Zhou, J. (2023). Phosphorylation regulation of nitrogen, phosphorus, and potassium uptake systems in plants. *The Crop Journal*, 11(4), 1034–1047. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.06.003>
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., & Chauhan, B. S. (1982). Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
- Highton, M. P., Bakken, L. R., Dörsch, P., Molstad, L., & Morales, S. E. (2022). Nitrite accumulation and impairment of N₂O reduction explains contrasting soil denitrification phenotypes. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108529. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108529>
- Hossain, M. S., DeLaune, P. B., & Gentry, T. J. (2023). Microbiome analysis revealed distinct microbial communities occupying different sized nodules in field-grown peanut. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1075575>

- Huang, X., Foster, G. D., Honeychuck, R. V., & Schreifels, J. A. (2009). The Maximum of Phosphate Adsorption at pH 4.0: Why It Appears on Aluminum Oxides but Not on Iron Oxides. *Langmuir*, 25(8), 4450–4461. <https://doi.org/10.1021/la803302m>
- Huang, Y., Wang, Y., & Ziehn, T. (2022). Nonlinear interactions of land carbon cycle feedbacks in Earth System Models. *Global Change Biology*, 28(1), 296–306. <https://doi.org/10.1111/gcb.15953>
- Hurtado-Martinez, M., Muñoz-Palazon, B., Gonzalez-Martinez, A., Manzanera, M., & Gonzalez-Lopez, J. (2021). Groundwater Nitrate Removal Performance of Selected Pseudomonas Strains Carrying nosZ Gene in Aerobic Granular Sequential Batch Reactors. *Water*, 13(8), 1119. <https://doi.org/10.3390/w13081119>
- Jackson, R. B., Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Peters, G. P., Roy, J., & Wu, L. (2017). Warning signs for stabilizing global CO₂ emissions. *Environmental Research Letters*, 12(11), 110202. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9662>
- Jeltsch-Thömmes, A., & Joos, F. (2023). Carbon Cycle Responses to Changes in Weathering and the Long-Term Fate of Stable Carbon Isotopes. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 38(2). <https://doi.org/10.1029/2022PA004577>
- Joachimski, M. M., Müller, J., Gallagher, T. M., Mathes, G., Chu, D. L., Mouraviev, F., Silantiev, V., Sun, Y. D., & Tong, J. N. (2022). Five million years of high atmospheric CO₂ in the aftermath of the Permian-Triassic mass extinction. *Geology*, 50(6), 650–654. <https://doi.org/10.1130/G49714.1>

- Kellermann, R., Hauge, K., Tjåland, R., Thalmann, S., Bakken, L. R., & Bergaust, L. (2022). Preparation for Denitrification and Phenotypic Diversification at the Cusp of Anoxia: a Purpose for N₂O Reductase Vis-à-Vis Multiple Roles of O₂. *Applied and Environmental Microbiology*, 88(21). <https://doi.org/10.1128/aem.01053-22>
- Kikuchi, S., Fujitani, H., Ishii, K., Isshiki, R., Sekiguchi, Y., & Tsuneda, S. (2023). Characterisation of bacteria representing a novel Nitrosomonas clade: Physiology, genomics and distribution of missing ammonia oxidizer. *Environmental Microbiology Reports*, 15(5), 404–416. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13158>
- Kull, A., Kikas, T., Penu, P., & Kull, A. (2023). Modeling Topsoil Phosphorus—From Observation-Based Statistical Approach to Land-Use and Soil-Based High-Resolution Mapping. *Agronomy*, 13(5), 1183. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051183>
- Lee, A., Winther, M., Priemé, A., Blunier, T., & Christensen, S. (2017). Hot spots of N₂O emission move with the seasonally mobile oxic-anoxic interface in drained organic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 115, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.025>
- Leong, C. L., How, S. W., Rabuni, M. F., Mohd Aris, A., Khor, B. C., Curtis, T. P., & Chua, A. S. M. (2023). Pilot Study of Oxic–Anoxic Process under Low Dissolved Oxygen for Nitrogen Removal from Low COD/N Tropical Wastewater. *Water*, 15(11), 2070. <https://doi.org/10.3390/w15112070>
- Li, J., Wang, W., Wang, W., & Li, Y. (2022). The Ability of Nitrification Inhibitors to Decrease Denitrification Rates in an Arable Soil. *Agronomy*, 12(11), 2749. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112749>

- Liang, X., Liu, J., Chen, Y., Li, H., Ye, Y., Nie, Z., Su, M., & Xu, Z. (2010). Effect of pH on the release of soil colloidal phosphorus. *Journal of Soils and Sediments*, 10(8), 1548–1556. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0275-6>
- Linn, D. M., & Doran, J. W. (1984). Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, 48, 1267–1272.
- Liu, C., Ma, J., Qu, T., Xue, Z., Li, X., Chen, Q., Wang, N., Zhou, Z., & An, S. (2022). Extracellular Enzyme Activity and Stoichiometry Reveal Nutrient Dynamics during Microbially-Mediated Plant Residue Transformation. *Forests*, 14(1), 34. <https://doi.org/10.3390/f14010034>
- Mayakaduwege, S., Mosley, L. M., & Marschner, P. (2021). Phosphorus Pools in Acid Sulfate Soil Are Influenced by pH, Water Content, and Addition of Organic Matter. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 1066–1075. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00422-2>
- McConnell, C. A., Kaye, J. P., & Kemanian, A. R. (2020). Reviews and syntheses: Ironing out wrinkles in the soil phosphorus cycling paradigm. *Biogeosciences*, 17(21), 5309–5333. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5309-2020>
- Menezes-Blackburn, D., Zhang, H., Stutter, M., Giles, C. D., Darch, T., George, T. S., Shand, C., Lumsdon, D., Blackwell, M., Wearing, C., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., & Haygarth, P. M. (2016). A Holistic Approach to Understanding the Desorption of Phosphorus in Soils. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3371–3381. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05395>

- Moloantoa, K. M., Khetsha, Z. P., van Heerden, E., Castillo, J. C., & Cason, E. D. (2022). Nitrate Water Contamination from Industrial Activities and Complete Denitrification as a Remediation Option. *Water*, 14(5), 799. <https://doi.org/10.3390/w14050799>
- Moorlegghem, C. Van, Six, L., Degryse, F., Smolders, E., & Merckx, R. (2011). Effect of Organic P Forms and P Present in Inorganic Colloids on the Determination of Dissolved P in Environmental Samples by the Diffusive Gradient in Thin Films Technique, Ion Chromatography, and Colorimetry. *Analytical Chemistry*, 83(13), 5317–5323. <https://doi.org/10.1021/ac200748e>
- Müller, C., & Bünemann, E. K. (2014). A ³³P tracing model for quantifying gross P transformation rates in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 76, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.013>
- Nelsen, M. P., DiMichele, W. A., Peters, S. E., & Boyce, C. K. (2016). Delayed fungal evolution did not cause the Paleozoic peak in coal production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(9), 2442–2447. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517943113>
- Normand, P., Nouioui, I., Neumann-Schaal, M., Herrera-Belaroussi, A., Abrouk, D., Vemulapally, S., Guerra, T., & Hahn, D. (2023). *Frankia umida* sp. nov., isolated from root nodules of *Alnus glutinosa* L. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 73(6). <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005939>

- Nunes, R. de S., de Sousa, D. M. G., Goedert, W. J., de Oliveira, L. E. Z., Pavinato, P. S., & Pinheiro, T. D. (2020). Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00350>
- Oehl, F., Frossard, E., Fliessbach, A., Dubois, D., & Oberson, A. (2004). Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(4), 667–675. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.010>
- Pavinato, P. S., Sánchez-Rodríguez, A. R., & Tiecher, T. (2022). Editorial: Sustainable Phosphorus Use in Agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 4. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.899924>
- Pistocchi, C., Mészáros, É., Tamburini, F., Frossard, E., & Bünemann, E. K. (2018). Biological processes dominate phosphorus dynamics under low phosphorus availability in organic horizons of temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 126, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.08.013>
- Potapov, A., Elisabetta Palumbo, M., Dionnet, Z., Longobardo, A., Jäger, C., Baratta, G., Rotundi, A., & Henning, T. (2022). Exploring Refractory Organics in Extraterrestrial Particles. *The Astrophysical Journal*, 935(2), 158. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7f32>
- Proctor, C., Coupel, P., Casciotti, K., Tremblay, J., Zakem, E., Arrigo, K. R., & Mills, M. M. (2023). Light, ammonium, pH, and phytoplankton competition as environmental factors controlling nitrification. *Limnology and Oceanography*, 68(7), 1490–1503. <https://doi.org/10.1002/lno.12359>

- Pujic, P., Carro, L., Fournier, P., Armengaud, J., Miotello, G., Dumont, N., Bourgeois, C., Saupin, X., Jame, P., Selak, G. V., Alloisio, N., & Normand, P. (2023). Frankia alni Carbonic Anhydrase Regulates Cytoplasmic pH of Nitrogen-Fixing Vesicles. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9162. <https://doi.org/10.3390/ijms24119162>
- Qiu, Z., Tao, H., Lu, B., Chen, Z., Wu, S., Liu, H., & Qiu, J. (2021). Controlling Factors on Organic Matter Accumulation of Marine Shale across the Ordovician-Silurian Transition in South China: Constraints from Trace-Element Geochemistry. *Journal of Earth Science*, 32(4), 887–900. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1359-x>
- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2021). Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 49–68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- Richardson, A. E., George, T. S., Hens, M., Delhaize, E., Ryan, P. R., Simpson, R. J., & Hocking, P. J. (2022). Organic anions facilitate the mobilization of soil organic phosphorus and its subsequent lability to phosphatases. *Plant and Soil*, 476(1–2), 161–180. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05405-5>
- Sabais, A. C. W., Eisenhauer, N., König, S., Renker, C., Buscot, F., & Scheu, S. (2012). Soil organisms shape the competition between grassland plant species. *Oecologia*, 170(4), 1021–1032. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2375-z>

- Schlüter, S., Zawallich, J., Vogel, H.-J., & Dörsch, P. (2019). Physical constraints for respiration in microbial hotspots in soil and their importance for denitrification. *Biogeosciences*, 16(18), 3665–3678. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3665-2019>
- Segura, A., Duque, E., Mosqueda, G., Ramos, J. L., & Junker, F. (1999). Multiple responses of Gram-negative bacteria to organic solvents. *Environmental Microbiology*, 1(3), 191–198. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.1999.00033.x>
- Sharma, U. C., Datta, M., & Sharma, V. (2022). *Soil Microbes and Biofertilizers* (pp. 117–144). https://doi.org/10.1007/978-3-031-11458-8_5
- Sheng, M., Lei, L., Zeng, Z.-C., Rao, W., & Zhang, S. (2021). Detecting the Responses of CO₂ Column Abundances to Anthropogenic Emissions from Satellite Observations of GOSAT and OCO-2. *Remote Sensing*, 13(17), 3524. <https://doi.org/10.3390/rs13173524>
- Smeck, N. E. (1985). Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, 36(3–4), 185–199. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(85\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(85)90001-1)
- Solangi, F., Zhu, X., Khan, S., Rais, N., Majeed, A., Sabir, M. A., Iqbal, R., Ali, S., Hafeez, A., Ali, B., Ercisli, S., & Kayabasi, E. T. (2023). The Global Dilemma of Soil Legacy Phosphorus and Its Improvement Strategies under Recent Changes in Agro-Ecosystem Sustainability. *ACS Omega*, 8(26), 23271–23282. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00823>

- Song, S., Zhang, J., Liu, Y., & Wang, H. (2023). Accumulation of Labile P Forms and Promotion of Microbial Community Diversity in Mollisol with Long-Term Manure Fertilization. *Agronomy*, 13(3), 884. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030884>
- Spieck, E., Wegen, S., & Keuter, S. (2021). Relevance of Candidatus Nitrotoga for nitrite oxidation in technical nitrogen removal systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(19), 7123–7139. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11487-5>
- Suri, N., Zhang, Y., Gieg, L. M., & Ryan, M. C. (2021). Denitrification Biokinetics: Towards Optimization for Industrial Applications. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.610389>
- Suzuki, T., Nishioka, T., Ishizuka, S., & Hara, H. (2010). A novel mechanism underlying phytate-mediated biological action-phytate hydrolysates induce intracellular calcium signaling by a Gαq protein-coupled receptor and phospholipase C-dependent mechanism in colorectal cancer cells. *Molecular Nutrition & Food Research*, 54(7), 947–955. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200900279>
- Tiessen, H., & Moir, J. O. (1993). *Characterization of available P by sequential extraction*, in: *Soil Sampling and Methods of Analysis* (M. R. Carter & E. G. Gregorich, Eds.; Second). Taylor & Francis.
- Turner, B. L. (2008). Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. *Journal of Ecology*, 96(4), 698–702. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01384.x>

- Vadstein, O., Jensen, A., Olsen, Y., & Reinertsen, H. (1988). Growth and phosphorus status of limnetic phytoplankton and bacteria. *Limnology and Oceanography*, 33(4), 489–503. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.4.0489>
- van de Wal, R. S. W., de Boer, B., Lourens, L. J., Köhler, P., & Bintanja, R. (2011). Reconstruction of a continuous high-resolution CO₂ record over the past 20 million years. *Climate of the Past*, 7(4), 1459–1469. <https://doi.org/10.5194/cp-7-1459-2011>
- von Blanckenburg, F., Schuessler, J. A., Bouchez, J., Frings, P. J., Uhlig, D., Oelze, M., Frick, D. A., Hewawasam, T., Dixon, J., & Norton, K. (2021). Rock weathering and nutrient cycling along an erodosequence. *American Journal of Science*, 321(8), 1111–1163. <https://doi.org/10.2475/08.2021.01>
- Wang, X., Ma, H., Guan, C., & Guan, M. (2022). Decomposition of Rapeseed Green Manure and Its Effect on Soil under Two Residue Return Levels. *Sustainability*, 14(17), 11102. <https://doi.org/10.3390/su141711102>
- Wen, A., Havens, K. L., Bloch, S. E., Shah, N., Higgins, D. A., Davis-Richardson, A. G., Sharon, J., Rezaei, F., Mohiti-Asli, M., Johnson, A., Abud, G., Ane, J.-M., Maeda, J., Infante, V., Gottlieb, S. S., Lorigan, J. G., Williams, L., Horton, A., McKellar, M., ... Temme, K. (2021). Enabling Biological Nitrogen Fixation for Cereal Crops in Fertilized Fields. *ACS Synthetic Biology*, 10(12), 3264–3277. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00049>

- Willeit, M., Ilyina, T., Liu, B., Heinze, C., Perrette, M., Heinemann, M., Dalmonech, D., Brovkin, V., Munhoven, G., Börker, J., Hartmann, J., Romero-Mujalli, G., & Ganopolski, A. (2023). The Earth system model CLIMBER-X v1.0 – Part 2: The global carbon cycle. *Geoscientific Model Development*, 16(12), 3501–3534. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-3501-2023>
- Williams, C., & Steinbergs, A. (1958). Sulphur and phosphorus in some Eastern Australian soils. *Australian Journal of Agricultural Research*, 9(4), 483. <https://doi.org/10.1071/AR9580483>
- Wu, R.-N., Meng, H., Wang, Y.-F., Lan, W., & Gu, J.-D. (2017). A More Comprehensive Community of Ammonia-Oxidizing Archaea (AOA) Revealed by Genomic DNA and RNA Analyses of amoA Gene in Subtropical Acidic Forest Soils. *Microbial Ecology*, 74(4), 910–922. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1045-4>
- Yang, X., & Post, W. M. (2011). Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*, 8(10), 2907–2916. <https://doi.org/10.5194/bg-8-2907-2011>
- Yu, W., Pavliuk, M. V., Liu, A., Zeng, Y., Xia, S., Huang, Y., Bai, H., Lv, F., Tian, H., & Wang, S. (2023). Photosynthetic Polymer Dots–Bacteria Biohybrid System Based on Transmembrane Electron Transport for Fixing CO₂ into Poly-3-hydroxybutyrate. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(1), 2183–2191. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c18831>

- Zhou, Z., Tian, F., Zhao, X., Zhang, K., & Han, S. (2022). Short-term but not long-term perennial mugwort cropping increases soil organic carbon in Northern China Plain. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.975169>
- Zhu, W., & He, Y. (2023). α -Ketoglutarate dehydrogenase (KGDH): A new balancer between energy metabolism and gene expression in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 65(8), 1843–1845. <https://doi.org/10.1111/jipb.13544>

BAB 5

PERANAN AIR TANAH

Oleh Edy Syafril Hayat

5.1 Pendahuluan

Air merupakan salah satu komponen penyusun tanah. Adanya air di dalam tanah karena air ditahan/diserap oleh massa tanah, tertahan oleh lapisan kedap air, atau karena keadaan drainase yang kurang baik. Air yang ada di dalam tanah akan diserap oleh akar tanaman dan akan dialirkan ke seluruh bagian tanaman melalui jaringan xilem. Fungsi air bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman adalah sebagai penyusun/bagian dari sel, sebagai bahan baku fotosintesis, sebagai pengangkut unsur hara di dalam jaringan tanaman, sebagai pelarut unsur hara, sebagai pengatur tekanan turgor, dan berperan dalam pemanjangan sel.

Air dapat meresap atau ditanah oleh tanah karena adanya gaya-gaya adhesi, kohesi dan gravitasi. Karena adanya gaya-gaya tersebut maka air dalam tanah dapat dibedakan menjadi 1). air higroskopik yaitu air yang diserap tanah sangat kuat sehingga tidak dapat digunakan tanaman (adhesi antara tanah dan air), dan 2). air kapiler yaitu air di dalam tanah dimana daya kohesi (tarik menarik antara butir-butir air) dan daya adhesi (antara air dan tanah) lebih kuat dari gravitasi. Air ini dapat bergerak ke samping atau ke atas karena gaya-gaya kapiler. Sebagian besar dari air kapiler merupakan air yang tersedia (dapat diserap) tanaman (Hardjowigeno, 2010). Gaya adhesi, kohesi, dan

gravitasi memainkan peran penting dalam interaksi air dengan tanah. Ketika air jatuh ke permukaan tanah, sebagian akan meresap ke dalam tanah karena adhesi dan kohesi, di mana air menempel pada partikel tanah dan pada dirinya sendiri sehingga dapat menembus pori-pori tanah (Lewa dkk., 2020). Faktor-faktor lingkungan seperti iklim, tanah, dan vegetasi juga memengaruhi infiltrasi air ke dalam tanah (Irawan & Yuwono, 2016). Selain itu, karakteristik tanah seperti tekstur, struktur, dan kelembaban awal juga memengaruhi proses infiltrasi air (Dipa, 2021). Air yang tersimpan dalam akuifer dapat dieksplorasi menggunakan metode geofisika seperti geolistrik (Sadjab dkk., 2012). Sistem pertambangan baik terbuka maupun bawah tanah dapat mempengaruhi sumberdaya air dengan cara infiltrasi dan perlokasi air bawah tanah (Pratiwi dkk., 2022).

Gaya gravitasi juga memengaruhi pergerakan air dalam tanah. Pasang surut air laut, yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi dari bumi, bulan, dan matahari, merupakan fenomena periodik yang mempengaruhi elevasi permukaan air laut (Lubis dkk., 2020). Perubahan elevasi ini juga dapat mempengaruhi infiltrasi air tanah di daerah pesisir (Lubis dkk., 2020). Selain itu, gaya gravitasi juga berperan dalam stabilitas lereng, di mana longsor merupakan perpindahan massa batuan atau tanah akibat pengaruh gravitasi sebagai respons terhadap aktivitas alam dan manusia (Situmorang dkk., 2022).

5.2 Hubungan Air, Tanah dan Tanaman

Air dan tanah memiliki hubungan yang sangat erat dengan pertumbuhan tanaman. Ketersediaan air dalam tanah memengaruhi kemampuan tanaman untuk tumbuh dan berkembang. Air dalam tanah dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kadar bahan organik, tekstur tanah, dan porositas tanah

(Nasution dkk., 2022). Tanaman memerlukan air untuk proses respirasi dan fotosintesis, dan ketersediaan air yang cukup dalam tanah sangat penting untuk menunjang proses-proses ini (Agsari dkk., 2020).

Selain itu, ketersediaan air dalam tanah juga berperan dalam penyerapan hara oleh tanaman. Air yang terdapat dalam pori-pori tanah membantu melarutkan unsur hara sehingga tanaman dapat menyerapnya dengan lebih mudah (Murniasih & Sukirno, 2019). Selain itu, air dalam tanah juga berperan dalam proses pelapukan mineral yang diperlukan oleh tanaman (Ambarsari, 2021).

Selain ketersediaan air, sifat fisik tanah seperti porositas, kemantapan agregat tanah, dan bobot isi tanah juga memengaruhi pertumbuhan tanaman. Porositas tanah dan air tersedia dalam tanah berhubungan dengan biomassa tanaman, namun faktor fisika tanah lainnya juga turut memengaruhi pertumbuhan tanaman (Fauziah et al., 2016). Susunan agregat tanah memengaruhi aerasi, ketersediaan air, dan kekuatan tanah, yang pada akhirnya memengaruhi pertumbuhan tanaman (Widiyanto, 2020).

Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara air, tanah, dan tanaman sangat kompleks dan saling terkait. Ketersediaan air dalam tanah, bersama dengan sifat fisik tanah, memainkan peran penting dalam mendukung pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Air memiliki peran yang signifikan dalam ketersediaan unsur hara dan pertumbuhan tanaman. Ketersediaan air dalam tanah memengaruhi kemampuan tanaman untuk menyerap unsur hara yang diperlukan untuk pertumbuhan (Sulakhudin & Latuponu, 2022). Air dalam tanah membantu melarutkan unsur hara sehingga tanaman dapat menyerapnya dengan lebih efisien (Dianita et al., 2021). Selain itu, ketersediaan air dalam tanah juga berperan dalam proses

pelapukan mineral yang diperlukan oleh tanaman (Mulyati dkk., 2019).

Pemberian air yang cukup diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman, karena melalui akar, tanaman mengabsorpsi air dari tanah untuk mendukung proses pertumbuhannya (Marcos & Muzaki, 2022). Selain itu, ketersediaan air dalam tanah juga berperan dalam menstabilkan suhu tanah yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman (Zanatia dkk., 2021). Air juga berperan dalam menjaga keseimbangan air dalam tanah, yang sangat penting untuk mendukung proses fotosintesis dan penyerapan unsur hara oleh tanaman.

Air memainkan peran krusial dalam ketersediaan unsur hara dan pertumbuhan tanaman. Ketersediaan air dalam tanah memengaruhi kemampuan tanaman untuk menyerap unsur hara yang diperlukan, serta mendukung proses fotosintesis dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

5.3 Proses Terbentuknya Air Tanah

Air tanah terbentuk melalui serangkaian proses geologi dan hidrologi yang kompleks. Salah satu faktor penting dalam pembentukan air tanah adalah proses infiltrasi, di mana air hujan atau air permukaan meresap ke dalam tanah melalui pori-pori dan retakan. Infiltrasi ini kemudian mengalami proses penyaringan alami saat air meresap melalui lapisan tanah dan batuan, yang dapat menghilangkan zat-zat terlarut dan menciptakan air tanah yang lebih murni (Lamb dkk., 2006).

Selain itu, proses geokimia juga memainkan peran penting dalam pembentukan air tanah. Misalnya, dalam beberapa kasus, mineral-mineral tertentu seperti dolomit dapat mempengaruhi komposisi kimia air tanah. Studi di Australia barat laut

menunjukkan bahwa formasi dolomit di daerah semi-arid dapat mempengaruhi pembentukan air tanah dolomit (Mather dkk., 2019).

Proses-proses seperti pelarutan evaporit dan pelapukan silikat juga dapat menjadi sumber salinitas dalam air tanah. Contohnya, di dataran Saveh di Iran, pelarutan evaporit dan pelapukan silikat merupakan penyebab utama salinitas air tanah (Mather dkk., 2018).

Dengan demikian, air tanah terbentuk melalui interaksi kompleks antara proses hidrologi, geologi, dan geokimia. Infiltrasi air, penyaringan alami, dan proses geokimia seperti pelarutan mineral berperan dalam membentuk karakteristik kimia dan fisika air tanah yang kita temui.

Faktor-faktor yang mempengaruhi infiltrasi air mencakup berbagai aspek yang dapat mempengaruhi kemampuan air untuk menembus ke dalam tanah. Salah satu faktor utamanya adalah kepadatan tanah, dimana tanah yang padat cenderung memiliki laju infiltrasi yang lebih rendah karena pori-pori yang lebih sedikit dan mengecil sehingga menyulitkan air untuk menembus (Yang & Zhang, 2011). Selain itu, pemadatan tanah juga dapat memperlambat infiltrasi air, membatasi penetrasi air ke lapisan tanah yang lebih dalam, dan meningkatkan limpasan permukaan dan penguapan (Pueyo dkk., 2012).

Selain kepadatan tanah, faktor lain yang mempengaruhi infiltrasi air adalah tekstur tanah. Penelitian telah menunjukkan bahwa tekstur tanah dapat mempengaruhi kapasitas infiltrasi, dimana tanah bertekstur kasar umumnya memiliki laju infiltrasi lebih tinggi dibandingkan dengan tanah bertekstur halus (Khoshravesht-Miangoleh & Kiani, 2014). Selain itu topografi juga dapat mempengaruhi resapan air, dimana kemiringan lahan dapat mempengaruhi laju infiltrasi dengan mempengaruhi

aliran air permukaan dan arah aliran air tanah (Basyar dkk., 2021).

Selain faktor fisik tanah, faktor biologis juga dapat mempengaruhi infiltrasi air. Pola spasial tumbuhan, seperti kepadatan tumbuhan dan komposisi komunitas, dapat mempengaruhi kapasitas infiltrasi air dengan mempengaruhi struktur tanah dan laju erosi (Pueyo dkk., 2012). Selain itu, sifat kimia air juga dapat berperan dalam infiltrasi air, dimana sifat kimia seperti pH dan kandungan garam dapat mempengaruhi kemampuan air untuk menembus ke dalam tanah (Zhang dkk., 2020).

Oleh karena itu, infiltrasi air dipengaruhi oleh berbagai faktor kompleks, antara lain kepadatan tanah, tekstur tanah, topografi, faktor biologis, dan sifat kimia air. Pemahaman terhadap faktor-faktor tersebut sangat penting dalam pengelolaan resapan air untuk mendukung kelestarian sumber daya air dan lingkungan.

5.4 Ketersediaan Air di dalam Tanah

Dalam menentukan jumlah air tersedia bagi tanaman terdapat beberapa istilah yang perlu dipahami. Air di dalam tanah dalam kaitannya dengan ketersediaan air bagi tanaman dapat dibagi menjadi tiga kondisi utama: air kapasitas lapang, titik layu permanen, dan air tersedia. Air kapasitas lapang merujuk pada jumlah air maksimum yang dapat disimpan oleh tanah setelah proses drainase berhenti, biasanya dicapai dalam 2-3 hari setelah hujan atau pembasahan. Air ini penting karena merupakan sumber air bagi tanaman yang dapat diakses setelah air hujan berhenti (Nurliani dkk., 2019).

Titik layu permanen adalah kondisi di mana tanaman tidak lagi dapat menyerap air dari tanah, yang disebabkan oleh kekurangan air yang signifikan. Air yang tersedia di dalam tanah berada di antara kapasitas lapang dan titik layu permanen, dan merupakan air yang dapat diakses oleh tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangannya (Khodijah & Soemarno, 2019).

Air tersedia sangat penting bagi tanaman karena merupakan air yang dapat digunakan oleh tanaman untuk proses fisiologisnya. Ketersediaan air ini memengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman, sehingga pemahaman yang baik tentang kondisi air kapasitas lapang, titik layu permanen, dan air tersedia sangat penting dalam manajemen air untuk pertanian yang efisien (Khodijah & Soemarno, 2019).

Besarnya tegangan air menunjukkan besarnya tenaga yang diperlukan untuk menahan air tersebut di dalam tanah. Tegangan diukur dalam bar, kPa (kilo Pascal), atmosfer, cm air, atau logaritma dari cm air yang disebut pF. Kandungan air pada kapasitas lapang ditunjukkan oleh kandungan air pada tegangan $1/3$ bar, sedangkan kandungan air pada titik layu permanen adalah pada tegangan 15 bar. Air tersedia bagi tanaman adalah air yang terdapat pada tegangan $1/3$ bar – 15 bar (Hardjowigeno, 2010).

Tegangan air tanah memiliki keterkaitan erat dengan ketersediaan air bagi tanaman. Tegangan air tanah merujuk pada gaya yang diperlukan untuk menarik air dari tanah ke akar tanaman. Tegangan air yang tinggi menunjukkan bahwa air sulit diakses oleh tanaman karena tanah "menahan" air dengan kuat, sementara tegangan air yang rendah menunjukkan ketersediaan air yang lebih baik bagi tanaman karena tanah "melepaskan" air dengan lebih mudah (Thompson dkk., 2007).

Proses penyerapan air oleh tanaman dipengaruhi oleh tegangan air tanah di sekitar akar. Tegangan air tanah yang optimal memungkinkan tanaman untuk mengakses air dengan efisien, sementara tegangan air yang ekstrem dapat menghambat penyerapan air oleh tanaman (Dipa, 2021).

Tegangan air tanah juga memengaruhi distribusi air di dalam tanah dan dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Perubahan tegangan air tanah dapat memengaruhi kemampuan tanaman untuk menyerap air dan nutrisi, serta ketersediaan air bagi tanaman dalam jangka panjang (Viola dkk., 2020).

5.5 Peranan Air Bagi Tanaman

Air tanah memegang peranan penting dalam berbagai aspek pertanian. Ketersediaan air tanah sangat berpengaruh pada produktivitas tanaman, terutama pada fase awal pemasakan dan pembentukan anakan (Fuadi dkk., 2016). Sifat fisik tanah, seperti tekstur dan porositas, juga turut berperan dalam menentukan kemampuan tanah untuk menyimpan air dan nutrisi yang dibutuhkan tanaman (Nurhartanto dkk., 2021; Habi, 2015). Selain itu, peranan air tanah juga terkait dengan stabilitas bendungan dan perubahan tekanan air pori tanah yang dipengaruhi oleh curah hujan dan evaporasi (Kamiruddin dkk., 2022).

Bahan organik dalam tanah memiliki peranan penting dalam mempertahankan dan meningkatkan kesuburan tanah. Pori-pori tanah yang dihasilkan dari kandungan bahan organik dapat membentuk tata air dan udara yang mendukung pertumbuhan tanaman (Kamsurya & Botanri, 2022; Suheri dkk., 2021). Selain itu, retensi air tanah dipengaruhi oleh kadar bahan organik, persentase debu, pasir, liat, dan jenis mineral

pembentuk tanah, yang berdampak pada daya alir air dan gesekan matriks tanah (Nasution dkk., 2022).

Upaya perbaikan kualitas tanah, seperti melalui aplikasi kompos, dapat meningkatkan aerasi tanah, daya serap air tanah, dan ketersediaan air yang dibutuhkan tanaman (Wahyudi, 2021). Selain itu, faktor-faktor seperti curah hujan, tekstur tanah, dan jenis batuan juga memiliki peranan penting dalam imbuhan air tanah (Narulita, 2017). Dengan demikian, pemahaman yang mendalam mengenai peranan air tanah dan interaksi dengan sifat fisik tanah serta bahan organik sangat penting dalam mendukung produktivitas pertanian dan keberlanjutan lingkungan.

Peranan air bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman adalah sebagai penyusun/bagian dari sel, sebagai bahan baku fotosintesis, sebagai pengangkut unsur hara di dalam jaringan tanaman, sebagai pelarut unsur hara, sebagai pengatur tekanan turgor, dan berperan dalam pemanjangan sel.

5.5.1 Air sebagai Penyusun/Bagian dari Sel

Air memainkan peranan penting sebagai penyusun sitoplasma sel. Sitoplasma adalah bagian sel yang terletak di antara membran sel dan inti sel, yang mengandung berbagai organel sel dan struktur seluler lainnya. Air merupakan komponen utama dari sitoplasma sel, membentuk medium di mana reaksi kimia seluler terjadi. Selain itu, air juga berperan dalam menjaga kelembaban dan keseimbangan cairan di dalam sel, yang sangat penting untuk kelangsungan hidup sel dan berbagai proses metabolik.

Pratiwi (2017) menyebutkan bahwa unsur hara nitrogen berperan sebagai penyusun struktural tubuh tumbuhan dan berperan dalam proses fisiologis. Air, yang mengandung unsur

hara dan nutrisi penting lainnya, turut berkontribusi dalam menyusun struktur sel dan memastikan berbagai proses seluler dapat berjalan dengan lancar. Selain itu, Iqbal dkk. (2019) juga menekankan bahwa air memiliki peranan penting sebagai pelarut unsur hara yang diserap oleh tanaman dalam bentuk larutan tanaman, yang kemudian digunakan sebagai penyusun utama protoplasma sel.

Air tidak hanya berperan sebagai bahan baku dalam fotosintesis, tetapi juga sebagai komponen utama dalam menyusun sitoplasma sel. Ketersediaan air yang cukup dan keseimbangan nutrisi di dalamnya sangat penting untuk menjaga integritas sel, mendukung proses metabolisme, dan memastikan kelangsungan hidup organisme.

5.5.2 Air sebagai Bahan Baku Fotosintesis

Air memiliki peranan yang sangat penting sebagai bahan baku dalam proses fotosintesis tanaman. Fotosintesis merupakan proses di mana tanaman menggunakan air, karbon dioksida, dan energi matahari untuk menghasilkan glukosa dan oksigen. Air merupakan sumber utama hidrogen yang digunakan dalam pembentukan glukosa selama fotosintesis. Tanaman menyerap air melalui akar mereka dan kemudian mengangkutnya ke daun, di mana air ini akan dipecah menjadi hidrogen dan oksigen melalui reaksi fotosintesis .

Selain itu, air juga berperan dalam menjaga turgor sel tanaman, yang penting untuk menjaga kekakuan dan bentuk tanaman. Kekurangan air dapat menyebabkan penurunan turgor sel, yang pada gilirannya dapat menghambat proses fotosintesis . Oleh karena itu, ketersediaan air yang cukup sangat penting dalam mendukung proses fotosintesis dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Dalam konteks pertanian, pengelolaan air tanah dan irigasi yang tepat sangat diperlukan untuk memastikan ketersediaan air yang cukup bagi tanaman selama proses fotosintesis. Selain itu, pemahaman yang baik tentang sifat fisik tanah dan kandungan bahan organik juga dapat mempengaruhi kemampuan tanah untuk menyimpan air yang diperlukan oleh tanaman selama fotosintesis.

Dengan demikian, air tidak hanya berperan sebagai bahan baku utama dalam fotosintesis tanaman, tetapi juga sebagai faktor kunci dalam menjaga keseimbangan hidrasi sel tanaman dan mendukung pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

5.5.3 Air sebagai pengangkut unsur hara di dalam jaringan tanaman

Air memiliki peran penting sebagai alat transportasi unsur hara dalam jaringan tanaman. Proses transpirasi, yaitu penguapan air melalui stomata daun, memiliki fungsi penting dalam transportasi air dan unsur hara dalam tanaman. Transpirasi juga membantu dalam mendorong transportasi xilem dari akar ke bagian atas tanaman dan aliran massa unsur hara melalui tanah ke rizosfer (Cramer dkk., 2009). Selain itu, air juga berperan dalam pengangkutan nutrisi dan zat penting lainnya dalam tanaman. Air membantu dalam mengangkut nutrisi dari akar ke bagian lain tanaman (Bárzana dkk., 2020).

Selain transpirasi, hubungan simbiotik antara tanaman dan fungi mikoriza arbuskula (AMF) juga berperan dalam transportasi unsur hara. AMF tidak hanya menyediakan nutrisi bagi tanaman, tetapi juga meningkatkan penyerapan air, resistensi terhadap penyakit, pertahanan kimia tanaman, agregasi tanah, dan transportasi serta perlindungan senyawa alelokimia (Delavaux dkk., 2017).

Protein transporter pada membran sel juga berperan dalam pengangkutan nutrisi dan air dalam tanaman. Protein transporter ini bertanggung jawab atas penyerapan nutrisi dan air, seperti aquaporin yang berperan dalam transportasi air (Bárzana dkk., 2020). Selain itu, pembentukan pembuluh tanaman (vaskular) juga memiliki peran penting dalam transportasi nutrisi, sinyal pertumbuhan, asam amino, dan protein antara jaringan atas dan bawah tanaman (Liu dkk., 2021).

Air berperan sebagai alat transportasi utama dalam tanaman, membantu dalam pengangkutan unsur hara dari akar ke bagian atas tanaman, serta dalam proses pengangkutan nutrisi dan zat penting lainnya dalam jaringan tanaman.

5.5.4 Air sebagai pelarut unsur hara

Air memiliki peranan yang sangat penting sebagai pelarut unsur hara dalam tanah. Ketika air meresap ke alam tanah, ia berperan sebagai medium yang membawa unsur hara dari tanah ke akar tanaman. Penelitian oleh (Maslukah dkk., 2019) menunjukkan bahwa distribusi dan aliran unsur hara nitrogen dan fosfor dalam air pori sedimen di estuari Jepara, Indonesia, menunjukkan bahwa air memainkan peran penting dalam menyediakan unsur hara bagi tanaman (Maslukah dkk., 2019). Selain itu, aplikasi pupuk organik cair, seperti yang disebutkan oleh (Illah, 2022), juga dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman, karena pupuk organik cair mengandung nutrisi yang larut dalam air dan dapat diserap oleh tanaman dengan lebih efisien (Illah, 2022).

Pupuk organik cair, seperti trichokompos kotoran sapi, juga mengandung unsur hara yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, seperti yang disebutkan dalam penelitian oleh (Rahma &

Muflihayati, 2022). Selain itu, aplikasi pupuk organik cair dari bahan organik nabati dan silika, seperti dalam penelitian oleh (Nisa & Rahayu, 2021), juga dapat memberikan nutrisi tambahan bagi tanaman dan membantu dalam mengatasi cekaman air (Nisa & Rahayu, 2021).

Dengan demikian, air berperan sebagai pelarut yang membantu dalam mengangkut unsur hara dari pupuk organik cair dan nutrisi dalam tanah ke akar tanaman, sehingga mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman secara optimal.

5.5.5 Air sebagai pengatur tekanan turgor

Pembukaan dan penutupan stomata pada tanaman memainkan peran penting dalam mengatur pertukaran gas, kehilangan air, dan penyerapan nutrisi. Proses pembukaan stomata dipengaruhi oleh berbagai faktor, dan ketersediaan air menjadi faktor penentu utama. Lakitan (2004) menyoroti bahwa pembukaan stomata terjadi ketika ada peningkatan tekanan turgor pada sel penjaga, yang terjadi ketika air masuk ke dalam sel tersebut. Mekanisme ini memungkinkan terjadinya pengaturan pertukaran gas dan transpirasi pada tumbuhan.

Selain itu, Nurcahya dkk. (2022) menekankan bahwa air memainkan peran yang beragam pada tanaman, termasuk menjaga turgiditas sel, membantu pembesaran sel, dan memfasilitasi pembukaan stomata. Air sangat penting untuk memastikan fungsinya sel penjaga, yang mengontrol pembukaan dan penutupan stomata. Lebih lanjut, Boy dkk. (2022) menyebutkan bahwa pengaturan pembukaan stomata sangat penting untuk mencegah kehilangan air yang berlebihan melalui transpirasi, terutama pada saat cekaman kekeringan ketika stomata cenderung menutup untuk menghemat air.

Singkatnya, ketersediaan air sangat penting untuk pembukaan stomata pada tumbuhan. Ini secara langsung mempengaruhi tekanan turgor di sel penjaga, yang penting untuk pengaturan bukaan stomata dan proses pertukaran gas. Memahami peran air dalam fungsi stomata sangat penting untuk memahami respons tanaman terhadap isyarat dan tekanan lingkungan, seperti kondisi kekeringan.

Air memainkan peran penting dalam membuka dan menutupnya stomata pada tanaman. Ketika sel-sel penjaga (guard cells) di sekitar stomata menyerap air, tekanan turgor di dalam sel-sel ini meningkat. Hal ini menyebabkan sel-sel penjaga membengkak dan membuka stomata. Sebaliknya, ketika sel-sel penjaga kehilangan air, tekanan turgor menurun, menyebabkan sel-sel penjaga menyusut dan stomata tertutup. Proses ini memungkinkan tanaman mengatur pertukaran gas, seperti penyerapan karbon dioksida dan pelepasan oksigen, serta mengontrol tingkat transpirasi untuk menjaga keseimbangan air dalam tanaman.

Manurung dkk. (2019) juga menunjukkan bahwa penurunan tekanan turgor selama kekeringan dapat menghambat pemanjangan dan pembesaran sel tanaman, yang pada akhirnya mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, peran air dalam menjaga tekanan turgor sel sangat penting dalam mengatur pembukaan dan penutupan stomata, serta dalam mendukung proses pemanjangan sel yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman.

Air berperan sebagai medium yang mempengaruhi tekanan turgor sel, yang pada gilirannya mengatur pembukaan dan penutupan stomata serta proses pemanjangan sel pada tanaman. Pemahaman tentang interaksi antara air, tekanan turgor, dan fungsi stomata penting untuk memahami respons

tanaman terhadap kondisi lingkungan, termasuk kekeringan dan ketersediaan air yang berubah-ubah.

5.5.6 Air berperan dalam pemanjangan sel

Air memainkan peran penting dalam pemanjangan sel tumbuhan. Salah satu fungsi utama air dalam pemanjangan sel adalah melalui tekanan turgor yang diciptakan di dalam sel. Kaiser & Scheuring (2020) menyatakan bahwa vacuola dalam sel tumbuhan dianggap mendorong pemanjangan sel melalui tekanan turgor. Ketika air masuk ke dalam sel, tekanan turgor meningkat, yang kemudian mendorong sel untuk memanjang. Selain itu, Nonami (1998) juga menunjukkan bahwa air berperan dalam mengontrol pemanjangan sel pada potensial air rendah, yang menunjukkan pentingnya air dalam mempengaruhi proses pemanjangan sel pada kondisi lingkungan tertentu.

Selain itu, hormon tumbuhan seperti auksin juga berperan dalam pemanjangan sel. Voesenek dkk. (2004) menyoroti bahwa hormon auksin berperan dalam mengatur pemanjangan tunas dengan cepat di bawah kondisi air. Auksin dapat mempengaruhi proses pemanjangan sel dan memengaruhi pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Air berperan penting dalam pemanjangan sel tumbuhan melalui tekanan turgor yang diciptakan di dalam sel serta interaksi dengan hormon tumbuhan seperti auksin. Pemahaman yang mendalam tentang peran air dalam pemanjangan sel dapat membantu dalam memahami mekanisme pertumbuhan tanaman dan respons tanaman terhadap kondisi lingkungan yang berbeda.

5.6 Mekanisme Masuknya Air ke Akar

Mekanisme masuknya air ke dalam akar tanaman melalui jalur symplas dan apoplas merupakan proses penting dalam penyerapan air dan nutrisi. Jalur symplas merujuk pada pergerakan zat melalui sitoplasma sel tanaman yang terhubung oleh plasmodesma, sedangkan jalur apoplas merujuk pada pergerakan zat di luar sitoplasma sel tanaman, seperti melalui dinding sel.

Studi oleh Kim dkk. (2018) menyatakan bahwa sebagian besar air diangkut melalui jalur apoplas ketika aliran air massal terjadi melalui transpirasi. Selain itu, studi oleh Wei dkk. (2020) menunjukkan bahwa hambatan apoplas seperti pita Casparian dan lamela suberin di endodermis mengontrol pergerakan air dan mineral ke dalam stele.

Selain itu, studi oleh Cholewa & Peterson (2004) menunjukkan bahwa ion seperti kalsium dapat bergerak melalui endodermis yang utuh, menunjukkan peran jalur symplas dalam pergerakan ion ke dalam aliran transpirasi.

Mekanisme masuknya air ke dalam akar tanaman melalui jalur symplas dan apoplas melibatkan interaksi kompleks antara aquaporin, dinding sel, dan struktur endodermis untuk mengatur penyerapan air dan nutrisi yang efisien.

5.7 Transportasi Air dalam Jaringan Tanaman

Mekanisme transportasi air dari akar ke daun melalui jaringan xilem merupakan proses vital dalam kehidupan tanaman. Xilem adalah jaringan pengangkut air dan nutrisi yang terdiri dari sel-sel mati yang membentuk saluran untuk mengangkut air dari akar ke daun. Aquaporin, protein

pengangkut air, memfasilitasi pergerakan air melintasi membran sel dalam xilem.

Studi oleh Prado dan Maurel Prado & Maurel (2013) menunjukkan bahwa aquaporin memainkan peran penting dalam regulasi hidraulik daun, dengan memfasilitasi transportasi air melintasi membran sel. Selain itu, studi oleh Aras (2022) menyatakan bahwa transportasi air dan nutrisi dari akar ke tunas terjadi melalui pembuluh xilem, yang didorong oleh gerakan stomata dan laju transpirasi.

Referensi oleh Choat dkk. (2005) menjelaskan bahwa pergerakan air melalui xilem tergantung pada gradien tekanan antara akar dan daun, di mana potensial air xilem harus paling negatif di daun dan paling sedikit negatif di akar agar air dapat diangkut ke permukaan daun. Selain itu, aquaporin juga berperan dalam mengatur konduktansi hidraulik daun, yang dapat meningkat secara signifikan dengan peningkatan paparan sinar matahari.

Mekanisme transportasi air dari akar ke daun melalui jaringan xilem melibatkan aquaporin dalam memfasilitasi pergerakan air melintasi membran sel, serta regulasi tekanan air xilem untuk memastikan air dapat mencapai daun dengan efisien.

5.8 Pemanfaatan dan Pelestarian Sumber Air Pertanian

Untuk mencapai pemanfaatan air yang berkelanjutan di bidang pertanian, berbagai strategi dapat diterapkan berdasarkan penelitian yang tersedia. Salah satu pendekatan utama adalah meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam sistem irigasi. Teknik irigasi yang presisi telah terbukti

menghemat hingga 50% air yang digunakan, hal ini menunjukkan adanya potensi konservasi air yang signifikan (Longchamps dkk., 2015). Selain itu, penerapan teknologi irigasi mikro dapat berfungsi sebagai alat pengelolaan untuk mendukung hubungan 'air-energi-makanan', mendorong pembangunan irigasi yang inklusif dan berkelanjutan di tengah tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim (Elshaikh, 2023).

Selain itu, penerapan praktik pertanian cerdas air dapat meningkatkan produksi pertanian secara signifikan sekaligus memastikan penggunaan air yang optimal. Pertanian cerdas air bertujuan untuk meningkatkan produktivitas tanaman dan pertanian, meningkatkan ketahanan pertanian, dan mengurangi emisi, sehingga berkontribusi terhadap praktik pertanian berkelanjutan (Ndlovu dkk., 2022). Pendekatan ini sejalan dengan konsep keberlanjutan irigasi yang lemah dan kuat, sehingga memberikan kerangka kerja bagi praktik irigasi dalam kondisi ketersediaan air yang terbatas (Borsato dkk., 2020).

Di wilayah yang sangat bergantung pada irigasi untuk pertanian, seperti Ethiopia, yang pasokan pangan dan perekonomiannya sangat bergantung pada pertanian tadah hujan (Ayana, 2021), mencari sumber air alternatif sangatlah penting. Desalinasi untuk pertanian telah dibandingkan antara wilayah seperti Oman dan Spanyol, hal ini menyoroti potensi efisiensi biaya dan keberlanjutan pendekatan ini dibandingkan dengan metode desalinasi tradisional (Jabri dkk., 2019).

Selain itu, mengatasi tantangan seperti kelangkaan air di bidang pertanian memerlukan pemahaman komprehensif tentang nilai global air di bidang pertanian. Fungsi utama lingkungan dan kebutuhan manusia sangat bergantung pada air, hal ini menekankan pentingnya praktik pengelolaan air berkelanjutan di lingkungan pertanian (D'Odorico dkk., 2020).

Dengan mengintegrasikan praktik pengelolaan air berkelanjutan, seperti penggunaan kembali air limbah untuk irigasi, sistem pertanian tidak hanya dapat mengamankan pasokan air tetapi juga menyediakan nutrisi penting bagi tanaman, sehingga berkontribusi terhadap pembangunan pertanian berkelanjutan (Huang, 2017).

Kesimpulannya, dengan menerapkan teknik irigasi hemat air, menerapkan praktik pertanian cerdas air, mengeksplorasi sumber air alternatif seperti desalinasi, dan menerapkan strategi pengelolaan air berkelanjutan, kita dapat mencapai pemanfaatan air berkelanjutan untuk tujuan pertanian, memastikan produktivitas jangka panjang dan konservasi lingkungan.

Budidaya tanaman yang hemat air merupakan salah satu pendekatan penting dalam pertanian berkelanjutan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah hidroponik, di mana tanaman dibudidayakan tanpa menggunakan tanah dan menggunakan air sebagai media pertumbuhan. Hidroponik memiliki keunggulan dalam penggunaan air yang lebih efisien, karena air yang digunakan dalam sistem ini dapat disirkulasikan kembali ke tanaman, mengurangi kebutuhan air secara signifikan (Putra & Pradhana, 2023). Selain itu, hidroponik juga memungkinkan pemakaian pupuk yang lebih hemat, produksi tanaman yang lebih tinggi, dan kualitas tanaman yang lebih baik (Putra & Pradhana, 2023).

Aquaponik juga merupakan metode budidaya yang hemat air, di mana ikan dan tanaman dibudidayakan secara terintegrasi. Sistem ini memungkinkan air kolam budidaya disaring oleh tanaman, mengurangi kandungan amoniak di air, dan meminimalisir penggunaan air bersih (Yusup, 2021). Aquaponik memiliki kelebihan dalam penggunaan air yang efisien, karena air yang digunakan dalam sistem ini dapat

digunakan kembali untuk pertumbuhan tanaman, menciptakan lingkungan yang berkelanjutan (Yusup, 2021).

Selain itu, teknologi vertiminaponik juga dapat menjadi solusi untuk budidaya tanaman yang hemat air. Vertiminaponik merupakan teknologi yang terintegrasi antara budidaya ikan dan tanaman, di mana talang-talang air digunakan sebagai wadah tanaman dan toren air digunakan untuk memelihara ikan (Rokhmah dkk., 2020). Dengan menggunakan teknologi ini, air dapat digunakan secara efisien untuk pertumbuhan tanaman dan ikan, menciptakan sistem yang berkelanjutan dalam penggunaan sumber daya air (Rokhmah et al., 2020).

Dengan menerapkan metode budidaya seperti hidroponik, aquaponik, dan vertiminaponik, petani dapat mengoptimalkan penggunaan air dalam pertanian, meningkatkan efisiensi sumber daya, dan menciptakan sistem pertanian yang berkelanjutan.

Untuk menjaga kelestarian sumber daya air bagi pertanian, berbagai upaya dapat dilakukan berdasarkan penelitian yang tersedia. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah pengelolaan air terpadu (Integrated Water Resources Management/IWRM). IWRM merupakan pendekatan holistik yang bertujuan untuk mengelola air secara efisien, adil, dan berkelanjutan Bosak dkk. (2016). Melalui pendekatan ini, sumber daya air dapat dimanfaatkan secara optimal untuk kegiatan pertanian, sambil memperhatikan keberlanjutan lingkungan.

Selain itu, praktik pengumpulan air hujan (rainwater harvesting) juga dapat menjadi solusi untuk menjaga kelestarian sumber daya air dalam pertanian. Pengumpulan air hujan dapat dilakukan untuk memenuhi kebutuhan air tanaman, mengurangi tekanan pada sumber daya air permukaan, dan meningkatkan

ketahanan pertanian terhadap perubahan iklim (Shadeed dkk., 2020). Dengan memanfaatkan teknologi pengumpulan air hujan, petani dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya air yang terbatas.

Selain itu, penerapan praktik pertanian organik juga dapat berkontribusi pada kelestarian sumber daya air. Pertanian organik memprioritaskan penggunaan bahan organik alami dan mengurangi penggunaan bahan kimia sintetis yang dapat mencemari sumber daya air (Ojha dkk., 2019). Dengan demikian, pertanian organik dapat membantu menjaga kualitas air dan keberlanjutan lingkungan pertanian.

Selain itu, upaya untuk meningkatkan kesadaran petani terhadap pentingnya konservasi sumber daya air juga merupakan langkah penting. Penelitian menunjukkan bahwa petani yang memiliki kesadaran lingkungan yang positif cenderung lebih mungkin untuk mengadopsi praktik-praktik konservasi, termasuk dalam pengelolaan sumber daya air (Prokopy dkk., 2008). Dengan demikian, edukasi dan sosialisasi mengenai pentingnya menjaga kelestarian sumber daya air dapat menjadi langkah awal yang efektif dalam mendukung pertanian berkelanjutan.

Dengan menerapkan pendekatan IWRM, praktik pengumpulan air hujan, pertanian organik, dan peningkatan kesadaran petani, dapat diharapkan kelestarian sumber daya air bagi pertanian dapat terjaga dengan baik, mendukung produktivitas pertanian yang berkelanjutan.

Untuk menjelaskan praktik penggunaan waduk sebagai salah satu upaya mengatasi krisis air dalam budidaya tanaman, dapat merujuk pada beberapa penelitian yang relevan.

Penelitian (Oweis & Hachum, 2006) yang membahas pengelolaan air terpadu, termasuk pemanenan air hujan dan praktik irigasi tambahan untuk meningkatkan produktivitas air pada sistem pertanian kering di Asia Barat dan Afrika Utara (Oweis & Hachum, 2006). . Dalam konteks ini, waduk dapat berfungsi sebagai sumber air tambahan untuk pengairan tanaman, terutama pada musim kemarau.

Selanjutnya penelitian Ginting dkk. (2019) juga relevan karena membahas optimalisasi penggunaan air embung/waduk untuk keperluan rumah tangga dan irigasi tetes (Ginting et al., 2019). Pemanfaatan embun sebagai sumber air untuk irigasi tetes dapat membantu menghemat air dan meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam budidaya tanaman.

Penelitian Sari dkk. (2022) juga dapat menjadi referensi yang relevan karena membahas manfaat embung untuk pasokan irigasi, pengembangan kolam ikan, peningkatan hasil pertanian, dan pariwisata (Sari dkk., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa waduk tidak hanya berperan sebagai sumber air untuk irigasi tanaman tetapi juga mendukung keberlanjutan pertanian melalui berbagai kegiatan terkait.

Dengan memanfaatkan waduk sebagai sumber air tambahan untuk irigasi tanaman, petani dapat mengatasi krisis air yang sering terjadi pada musim kemarau, meningkatkan produktivitas pertanian, dan membangun sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agsari, D., Utomo, M., Hidayat, K., & Niswati, A. (2020). Respon serapan hara makro-mikro dan produksi tanaman jagung (*zea mays l.*) terhadap pemupukan nitrogen dan praktik olah tanah jangka panjang. *Journal of Tropical Upland Resources (J Trop Upland Res)*, 2(1), 46-59. <https://doi.org/10.23960/jtur.vol2no1.2020.78>
- Ambarsari, H. (2021). Hubungan kadar air dan bobot isi tanah terhadap berat panen tanaman pakcoy pada kombinasi kompos sampah kota dan pupuk kandang sapi. *Agro Tatanen | Jurnal Ilmiah Pertanian*, 3(2), 1-6. <https://doi.org/10.55222/agrotatanen.v3i2.526>
- Aras, S. 2022. *Cortical Cells, Xylem Vessels, And Chlorophyll Biosynthesis Improved By Acetylsalicylic Acid And Sodium Nitroprusside In Peach Leaves*. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 59(3), 409-417. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.1037526>
- Ayana, M. (2021). Trend, status, and challenges of irrigation development in ethiopia—a review. *Sustainability*, 13(10), 5646. <https://doi.org/10.3390/su13105646>
- Bárzana, G., Ríos, J., Lopez-Zaplana, A., Nicolas-Espinosa, J., Yepes-Molina, L., García-Ibáñez, P., ... & Carvajal, M. 2020. *Interrelations Of Nutrient And Water Transporters In Plants Under Abiotic Stress*. *Physiologia Plantarum*, 171(4), 595-619. <https://doi.org/10.1111/pp1.13206>
- Basyar, C., Budihardjo, M., & Samadikun, B. (2021). Land use changes impact analysis to surface runoff in kalibenda village. *Jurnal Presipitasi Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 18(3), 546-555. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v18i3.546-555>

- Boy, R., Dewa, D., Putra, E., & Kurniasih, B. 2022. *Tanggapan Fisiologis Dan Hasil Empat Kultivar Padi Gogo Lokal Sulawesi Tengah Terhadap Cekaman Kekeringan*. Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia, 24(2), 132-144. <https://doi.org/10.31186/jipi.24.2.132-144>
- Borsato, E., Rosa, L., Marinello, F., & D'Odorico, P. (2020). Weak and strong sustainability of irrigation: a framework for irrigation practices under limited water availability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00017>
- Bosak, V., VanderZaag, A., Crolla, A., & Kinsley, C. (2016). Integrated water resources management: a case study of on-farm water use for potato processing. *Water Practice & Technology*, 11(1), 66-74. <https://doi.org/10.2166/wpt.2016.008>
- Choat, B., Lahr, E., Melcher, P., Zwieniecki, M., & Holbrook, N. 2005. *The Spatial Pattern Of Air Seeding Thresholds In Mature Sugar Maple Trees*. *Plant Cell & Environment*, 28(9), 1082-1089. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01336.x>
- Cholewa, E. and Peterson, C. 2004. *Evidence For Symplastic Involvement In The Radial Movement Of Calcium In Onion Roots*. *Plant Physiology*, 134(4), 1793-1802. <https://doi.org/10.1104/pp.103.035287>
- Cramer, M., Hawkins, H., & Verboom, G. 2009. *The Importance Of Nutritional Regulation Of Plant Water Flux*. *Oecologia*, 161(1), 15-24. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1364-3>

- Delavaux, C., Smith-Ramesh, L., & Kuebbing, S. 2017. *Beyond Nutrients: A Meta-Analysis Of The Diverse Effects Of Arbuscular Mycorrhizal Fungi On Plants And Soils*. Ecology, 98(8), 2111-2119. <https://doi.org/10.1002/ecy.1892>
- D, H., Doering-Saad, C., Cr, T., & Pritchard, J. 2002. *Sensitivity Of Cell Hydraulic Conductivity To Mercury Is Coincident With Symplasmic Isolation And Expression Of Plasmalemma Aquaporin Genes In Growing Maize Roots*. Planta, 215(6), 1047-1056. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0841-2>
- Dianita, R., Nabon, S., Purba, N., Ubaidillah, U., & Sy., A. (2021). Pengaruh ukuran bibit dan pupuk anorganik terhadap pertumbuhan tanaman kelor (*moringa oleifera*). Pastura, 11(1), 18. <https://doi.org/10.24843/pastura.2021.v11.i01.p04>
- Dipa, H. 2021. *Analisis Tingkat Laju Infiltrasi Pada Daerah Aliran Sungai (Das) Sail*. Jurnal Teknik, 15(1), 18-25. <https://doi.org/10.31849/teknik.v15i2.5011>
- D'Odorico, P., Chiarelli, D., Rosa, L., Bini, A., Zilberman, D., & Rulli, M. (2020). The global value of water in agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(36), 21985-21993. <https://doi.org/10.1073/pnas.2005835117>
- Elshaikh, A. (2023). Micro-irrigation technologies as management tool to support the 'water-energy-food' nexus. World Water Policy, 9(4), 815-822. <https://doi.org/10.1002/wwp2.12149>
- Fuadi, N., Purwanto, M., & Tarigan, S. 2016. *Kajian Kebutuhan Air Dan Produktivitas Air Padi Sawah Dengan Sistem Pemberian Air Secara Sri Dan Konvensional Menggunakan Irigasi Pipa*. Jurnal Irigasi, 11(1), 23. <https://doi.org/10.31028/ji.v11.i1.23-32>

- Fauziah, R., Susila, A., & Sulistyono, E. (2016). Budidaya bawang merah (*allium ascalonicum* l.) pada lahan kering menggunakan irigasi sprinkler pada berbagai volume dan frekuensi. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.29244/jhi.7.1.1-8>
- Ginting, S., Rahmandani, D., & Indarta, A. (2019). Optimasi pemanfaatan air embung kasih untuk domestik dan irigasi tetes. *Jurnal Irigasi*, 13(1), 41. <https://doi.org/10.31028/ji.v13.i1.41-54>
- Habi, M. 2015. *Pengaruh Aplikasi Kompos Granul Ela Sagu Diperkaya Pupuk Ponska Terhadap Sifat Fisik Tanah Dan Hasil Jagung Manis Di Inceptisol*. Biopendix Jurnal Biologi Pendidikan Dan Terapan, 1(2), 126-139. <https://doi.org/10.30598/biopendixvol1issue2page126-139>
- Hardjowigeno, S. 2010. *Ilmu Tanah*. Jakarta : CV.Akademia Pressindo.
- Huang, G. (2017). Planning for integrative management of wastewater disposal, irrigation water supply and fertilizer use: a case study in an arid land of china. *Journal of Water Resource and Protection*, 09(05), 482-492. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.95031>
- Illah, M. 2022. *Pemberian Pupuk Organik Cair Daun Gamal Terhadap Pertumbuhan Rumput Gajah Mini*. *Jurnal Sosial Sains*, 2(9), 1003-1014. <https://doi.org/10.36418/jurnalsosains.v2i9.485>
- Irawan, T. and Yuwono, S. 2016. *Infiltrasi pada berbagai tegakan hutan di arboretum Universitas Lampung*. *Jurnal Sylva Lestari*, 4(3), 21. <https://doi.org/10.23960/jsl3421-34>

- Iqbal, M., Barchia, M., & Romeida, A. 2019. *Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Melon (Cucumis Melo L.) Pada Komposisi Media Tanam Dan Frekuensi Pemupukan Yang Berbeda*. Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia, 21(2), 108-114. <https://doi.org/10.31186/jipi.21.2.108-114>
- Jabri, S., Zekri, S., Zarzoc, D., & Ahmed, M. (2019). Comparative analysis of economic and institutional aspects of desalination for agriculture in the sultanate of oman and spain. DWT, 156, 1-6. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24066>
- Kamiruddin, A., Chalid, A., Suprijono, A., & Siregar, C. 2022. *Pengaruh permeabilitas terhadap stabilitas keamanan bendungan gunungrowo*. Jurnal Teknik Sipil, 18(2), 313-327. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i2.4648>
- Kamsurya, M. and Botanri, S. 2022. *Peran bahan organik dalam mempertahankan dan perbaikan kesuburan tanah pertanian*; review. Jurnal Agrohut, 13(1), 25-34. <https://doi.org/10.51135/agh.v13i1.121>
- Kaiser, S. and Scheuring, D. 2020. Frontiers in Plant Science, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00553>
- Khodijah, S. and Soemarno, S. 2019. *Studi kemampuan tanah menyimpan air tersedia di sentra bawang putih kecamatan pujon, kabupaten malang*. Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan, 6(2), 1405-1414. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2019.006.2.21>
- Khoshravesh-Miangoleh, M. and Kiani, A. (2014). Effect of magnetized water on infiltration capacity of different soil textures. Soil Use and Management, 30(4), 588-594. <https://doi.org/10.1111/sum.12140>

- Kim, Y., Ranathunge, K., Lee, S., Lee, Y., Lee, D., & Sung, J. 2018. *Composite transport model and water and solute transport across plant roots: an update*. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00193>
- Lakitan, B. 2004. *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. PT. Raja Grafindo Persada. Jakarta.
- Lamb, M., Howard, A., Johnson, J., Whipple, K., Dietrich, W., & Perron, J. (2006). Can springs cut canyons into rock?. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(E7). <https://doi.org/10.1029/2005je002663>
- Lewa, Y., Yupi, H., & Nomeritae, N. 2020. *Analisis Air Larian Di Wilayah Jalan Temanggung Tilung Kota Palangka Raya Provinsi Kalimantan Tengah*. *Jurnal Teknik Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Keteknikan*, 4(1), 90-99. <https://doi.org/10.52868/jt.v4i1.2652>
- Liu, Y., Lin, T., Valencia, M., Zhang, C., & Lv, Z. 2021. *Unraveling the roles of vascular proteins using proteomics*. *Molecules*, 26(3), 667. <https://doi.org/10.3390/molecules26030667>
- Longchamps, L., Khosla, R., Reich, R., & Gui, D. (2015). Spatial and temporal variability of soil water content in leveled fields. *Soil Science Society of America Journal*, 79(5), 1446-1454. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.03.0098>
- Lubis, M., Puspita, W., Budiana, B., Purba, J., & Hakim, R. 2020. *Identifikasi Kedalaman Perairan (Batimetri) Terhadap Nilai Kedalaman Data Satelit Di Perairan Batu Ampar, Batam*. *Journal of Applied Sciences Electrical Engineering and Computer Technology*, 1(2), 6-12. <https://doi.org/10.30871/aseect.v1i2.2356>

- Maslukah, L., Wulandari, S., Prasetyawan, I., & Zainuri, M. 2019. *Distributions And Fluxes Of Nitrogen And Phosphorus Nutrients In Porewater Sediments In The Estuary Of Jepara Indonesia*. Journal of Ecological Engineering, 20(2), 58-64. <https://doi.org/10.12911/22998993/95093>
- Manurung, H., Kustiawan, W., & Kusuma, I. 2019. *The effect of drought stress on growth and total flavonoid content of tabat barito plant (ficus deltoidea jack)*. Jurnal Hortikultura Indonesia, 10(1), 55-62. <https://doi.org/10.29244/jhi.10.1.55-62>
- Marcos, H. and Muzaki, H. (2022). Monitoring suhu udara dan kelembaban tanah pada budidaya tanaman pepaya. Jurnal Teknologi Dan Sistem Tertanam, 3(2). <https://doi.org/10.33365/jtst.v3i2.2200>
- Mather, C., Nash, D., Dogramaci, S., Grierson, P., & Skrzypek, G. (2019). Geomorphic and hydrological controls on groundwater dolomite formation in the semi-arid hamersley basin, northwest australia. Earth Surface Processes and Landforms, 44(14), 2752-2770. <https://doi.org/10.1002/esp.4704>
- Mather, C., Skrzypek, G., Dogramaci, S., & Grierson, P. (2018). Paleoenvironmental and paleohydrochemical conditions of dolomite formation within a saline wetland in arid northwest australia. Quaternary Science Reviews, 185, 172-188. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.02.007>
- Mulyati, M., I.P, S., L.S, N., & Aini, K. (2019). Pengaruh takaran dan frekuensi pemberian pupuk bioekstrim terhadap beberapa sifat kimia tanah, pertumbuhan dan hasil kol bunga (brassica oleracea var botrytis l.). Jurnal Agrotek Ummat, 6(1), 01. <https://doi.org/10.31764/agrotek.v6i1.708>

- Murniasih, S. and Sukirno, S. (2019). Distribusi radionuklida alam sampel lingkungan tanah, air dan tanaman sekitar pltu rembang. *Ganendra Majalah Iptek Nuklir*, 22(1), 1. <https://doi.org/10.17146/gnd.2019.22.1.4063>
- Nasution, H., Yusfaneti, Y., & Saad, A. 2022. *Konversi hutan menjadi tanaman hortikultura durian, manggis dan duku terhadap perubahan beberapa sifat fisik entisol di desa talang duku kecamatan taman rajo kabupaten muaro jambi*. *Jurnal Agroecotania Publikasi Nasional Ilmu Budidaya Pertanian*, 5(2), 57-66. <https://doi.org/10.22437/agroecotania.v5i2.23040>
- Ndlovu, S., Agholor, A., & Sithole, M. (2022). Embracing water-smart agriculture for optimal agricultural production in selected areas of bushbuckridge, south africa.. <https://doi.org/10.17501/26827018.2021.6102>
- Nonami, H. 1998. *Plant water relations and control of cell elongation at low water potentials*. *Journal of Plant Research*, 111(3), 373-382. <https://doi.org/10.1007/bf02507801>
- Nurchahya, I., Manik, V., Matira, N., Natawijaya, D., & Sudartini, T. 2022. *Pertumbuhan tanaman ginseng jawa (talinum paniculatum gaertn) yang dipengaruhi volume penyiraman*. *Paspalum Jurnal Ilmiah Pertanian*, 10(2), 180. <https://doi.org/10.35138/paspalum.v10i2.445>
- Narulita, I. 2017. *Pendugaan Neraca Air Spasial Untuk Evaluasi Ketersediaan Sumberdaya Air Studi Kasus: Daerah Aliran Sungai Cerucuk, Pulau Belitung*. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(1), 120. <https://doi.org/10.29122/jtl.v18i1.543>

- Nurliani, L., Dwiratna, S., & Prawiranegara, B. 2019. *Analisis Penjadwalan Irigasi Pada Budidaya Tanaman Talas Pratama (Colocasia Esculenta (L). Schott Var. Pratama) Menggunakan Cropwat 8.0*. Jurnal Teknotan, 13(2), 47. <https://doi.org/10.24198/jt.vol13n2.3>
- Nurhartanto, N., Zulkarnain, Z., & Wicaksono, A. 2021. *Analisis beberapa sifat fisik tanah sebagai indikator kerusakan tanah pada lahan kering*. Journal of Tropical Agrifood, 107-112. <https://doi.org/10.35941/jatl.4.2.2022.7001.107-112>
- Nisa, F. and Rahayu, Y. 2021. *Pengaruh pupuk organik cair nabati dan silika terhadap pertumbuhan tanaman kedelai (glycine max) yang mengalami cekaman air*. Lenterabio Berkala Ilmiah Biologi, 11(1), 80-88. <https://doi.org/10.26740/lenterabio.v11n1.p80-88>
- Ojha, M., Kumar, V., Tiwari, D., Kumar, V., Kumar, M., & Singh, P. (2019). Organic onion production in nalanda: using eco-friendly agri. bios inputs. Current Journal of Applied Science and Technology, 1-4. <https://doi.org/10.9734/cjast/2019/v37i630311>
- Oweis, T. and Hachum, A. (2006). Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in west asia and north africa. Agricultural Water Management, 80(1-3), 57-73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.004>
- Putra, I. and Pradhana, I. (2023). Program sosialisasi pengembangan tanaman hidroponik di desa kampung kusamba guna meningkatkan ketahanan pangan. Abdimas Galuh, 5(1), 774. <https://doi.org/10.25157/ag.v5i1.10034>

- Pratiwi, A. 2017. *Effect of nitrogen fertilizer to the flavonoid content of red amaranth (amaranthus gangeticus l.)*. Pharmacia, 7(1), 87. <https://doi.org/10.12928/pharmaciana.v7i1.4213>
- Pratiwi, I., Anafiati, I., & Fridtriyanda, A. 2022. *Hidrogeologi Rencana Kegiatan Penambangan Dan Pengolahan Bijih Emas Di Kabupaten Aceh Tengah. Provinsi Aceh*. Jurnal Inovasi Pertambangan Dan Lingkungan, 2(1), 32-42. <https://doi.org/10.15408/jipl.v2i1.26052>
- Prado, K. and Maurel, C. 2013. *Regulation of leaf hydraulics: from molecular to whole plant levels*. Frontiers in Plant Science, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00255>
- Prokopy, L., Floress, K., Klotthor-Weinkauff, D., & Baumgart-Getz, A. (2008). Determinants of agricultural best management practice adoption: evidence from the literature. Journal of Soil and Water Conservation, 63(5), 300-311. <https://doi.org/10.2489/jswc.63.5.300>
- Pueyo, Y., Moret-Fernández, D., Sáiz, H., Bueno, C., & Alados, C. (2012). Relationships between plant spatial patterns, water infiltration capacity, and plant community composition in semi-arid mediterranean ecosystems along stress gradients. Ecosystems, 16(3), 452-466. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9620-5>
- Rahma, R. and Muflihayati, N. 2022 *Penggunaan Trichokompos Kotoran Sapi Untuk Meningkatkan Pertumbuhan Dan Produksi Ubi Jalar Varietas Cilembu (Ipomoea Batatas L.)*. Journal of Food Crop and Applied Agriculture, 2(2), 114-122. <https://doi.org/10.32530/jfcaa.v2i2.527>

- Rokhmah, N., Pertanian, J., Rahman, M., Sastro, Y., & Bengkulu, B. (2020). Reduksi amonia oleh kangkung darat (*ipomea reptans*) pada budidaya ikan menggunakan teknologi vertiminaponik..
<https://doi.org/10.25047/agropross.2020.9>
- Sadjab, B. and Tanauma, A. 2012. *Pemetaan Akuifer Air Tanah Di Sekitar Candi Prambanan Kabupaten Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta Dengan Menggunakan Metode Geolistrik Tahanan Jenis*. Jurnal Mipa, 1(1), 37.
<https://doi.org/10.35799/jm.1.1.2012.432>
- Sari, S., Triwuryanto, T., & Ramadhanti, A. (2022). Perhitungan rancangan anggaran biaya embung desa kalirejo, kulon progo diy. Jompa Abdi Jurnal Pengabdian Masyarakat, 1(2), 32-40. <https://doi.org/10.55784/jompaabdi.vol1.iss2.73>
- Shadeed, S., Judeh, T., & Riksen, M. (2020). Rainwater harvesting for sustainable agriculture in high water-poor areas in the west bank, palestine. Water, 12(2), 380.
<https://doi.org/10.3390/w12020380>
- Situmorang, A., Kusrin, K., Christa, N., Pratiwi, Y., Widyarini, G., & Widiatmoko, K. 2022. *Pengaruh Pelapukan Lapisan Batuan Terhadap Stabilitas Lereng*. Teras Jurnal, 12(2), 331.
<https://doi.org/10.29103/tj.v12i2.707>
- Suheri, H., Kusmarwiyah, R., & Isnaini, M. 2021. *Pengelolaan legum penutup tanah untuk meningkatkan kualitas tanah di aikmel utara, lombok timur*. Jurnal Siar Ilmuwan Tani, 2(2), 112-117. <https://doi.org/10.29303/jsit.v2i2.53>
- Sulakhudin, S. and Latuponu, H. (2022). Pengaruh residu amelioran dan lapisan semipermeabel terhadap beberapa sifat tanah dan pertumbuhan tanaman jagung di lahan pasca penambangan emas tanpa izin. Jurnal Agrohut, 13(2), 57-65. <https://doi.org/10.51135/agh.v13i2.154>

- Thompson, R., Gallardo, M., Valdez, L., & Fernández, M. 2007. *Using Plant Water Status To Define Threshold Values For Irrigation Management Of Vegetable Crops Using Soil Moisture Sensors*. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.007>
- Viola, T., As'ari, A., Tongkukut, S., Tamod, Z., Tatuwo, D., Hartaty, L., ... & Malinggas, C. 2020. *Hidrologi Bawah Permukaan Tanah: Studi Kasus Di Lokasi Pra Tpa Kawasan Ilo Ilo Kecamatan Wori Kabupaten Minahasa Utara*. *Jurnal Mipa*, 9(2), 38. <https://doi.org/10.35799/jmuo.9.2.2020.28231>
- Voesenek, L., Rijnders, J., Peeters, A., Steeg, H., & Kroon, H. 2004. *Plant hormones regulate fast shoot elongation under water: from genes to communities*. *Ecology*, 85(1), 16-27. <https://doi.org/10.1890/02-740>
- Wahyudi, N. 2021. *Aplikasi poc pomi dan kompos tricho jagung terhadap pertumbuhan kailan (brassica oleraceae.l)*. *Agrihumanis Journal of Agriculture and Human Resource Development Studies*, 2(2), 109-118. <https://doi.org/10.46575/agrihumanis.v2i2.87>
- Wei, X., Yang, Z., Han, G., Zhao, X., Yin, S., Yuan, F., ... & Wang, B. 2020. *The developmental dynamics of the sweet sorghum root transcriptome elucidate the differentiation of apoplastic barriers*. *Plant Signaling & Behavior*, 15(3), 1724465. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1724465>
- Widiyanto, S. (2020). *Pendugaan musim tanam tanaman pangan di kabupaten parigi moutong provinsi sulawesi tengah*. *Megasains*, 11(01), 12-19. <https://doi.org/10.46824/megasains.v11i01.2>

- Yang, J. and Zhang, G. (2011). Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Journal of Soils and Sediments*, 11(5), 751-761. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0356-1>
- Yusup, M. (2021). Produksi ikan hias dan sayur organik melalui teknologi aquaponik di pokdakan betta 13 desa totokaton kabupaten lampung tengah. *Sakai Sambayan Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), 93. <https://doi.org/10.23960/jss.v5i2.298>
- Zanatia, K., Hidayat, C., & Utami, E. (2021). Respons tanaman bawang merah terhadap pemberian pupuk organik cair air kelapa dan mikroorganisme lokal bonggol pisang. *Jurnal Pertanian Terpadu*, 9(1), 81-94. <https://doi.org/10.36084/jpt.v9i1.313>
- Zhang, R., Sun, Z., Li, G., Wang, H., Cheng, J., & Hao, M. (2020). Influences of water chemical property on infiltration into mixed soil consisting of feldspathic sandstone and aeolian sandy soil. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76548-7>

BAB 6

FAKTOR-FAKTOR PEMBENTUKAN TANAH

Oleh Ishak Musaad

Pengertian tanah sudah diberikan pada bab 1, namun sebelum membahas lebih jauh tentang faktor-faktor pemebentukan tanah, maka perlu dikemukakan pengertian tanah berdasarkan konsep Taksonomy Tanah. Pengertian tanah berdasarkan Soil Taxonomy, tanah adalah kumpulan benda benda alam yang terdapat dipermukaan bumi, setempat setempat dimodifikasi atau bahkan dibuat oleh manusia dari bahan-bahan yang berasal dari tanah, mengandung jasad hidup dan mendukung atau mampu mendukung tanaman atau tumbuh-tumbuhan yang hidup di alam terbuka (Soil Survey Staff, 1992). Dalam bidang pertanian, tanah dapat diartikan sebagai media atau tempat tumbuhnya tanaman. Tanah berasal dari hasil pelapukan batuan, bercampur dengan sisa-sisa bahan organik dan organisme (vegetasi dan hewan) yang hidup di atas atau di dalamnya. Disamping hasil pelapukan batuan dan bahan organik, air dan udara juga merupakan komponen yang terdapat di dalam tanah yang menempati pori-pori tanah. Air yang berada di dalam tanah berasal dari air hujan yang jatuh dan mengalir melalui run off atau terinfiltrasi ke dalam tanah, ditahan oleh tanah sehingga tidak meresap ke tempat lain. Disamping terjadinya percampuran bahan mineral dengan bahan organik, maka terbentuk pula lapisan-lapisan tanah atau horizon selama proses pembentukan tanah (Arifin et al., 2018) .

Tanah terbentuk melalui proses yang terjadi secara alami yang dipengaruhi oleh berbagai faktor. Ilmu yang mempelajari proses-proses pembentukan tanah mulai dari pelapukan bahan induk sampai terbentuknya tanah, disebut pedologi. Dalam bidang pedologi dipelajari genesa tanah, morfologi tanah, dan klasifikasi tanah. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses pembentukan tanah, tetapi hanya lima faktor yang dianggap paling penting. Vasily Dokuchaev yang telah populer dianggap sebagai bapak pedologi tanah mengemukakan bahwa, pembentukan tanah terjadi seiring dengan bertambahnya waktu, dibawah pengaruh bahan induk, iklim, organisme, dan topografi. Tanah terbentuk oleh hasil interaksi dari kelima faktor tersebut, dan faktor lainnya. Faktor-faktor dalam pembentukan tanah dapat dirumuskan berikut:

Soil = f (iklim, organisme, bahan induk, relief/topografi, waktu).
Hans Jenny, seorang ilmuwan Tanah dan Pedologi membuat persamaan : $S = f (cl, o, r, p, t, \dots)$, (S = soil formation, cl = climate, o = organism, r = relief, p = parent material, t = time) (Tripathy et al., 2019)

Dari kelima faktor tersebut, faktor yang paling aktif adalah iklim, karena iklim menyebabkan terjadinya proses pelapukan yang dipengaruhi oleh curah hujan, suhu, dan kelamban. Secara umum tanah dapat difahami sebagai suatu benda alami heterogen yang terdiri atas komponen-komponen padat, cair, dan gas yang mempunyai sifat dan karakteristik yang dinamis. Dengan bervariasinya kelima faktor tersebut antar wilayah, maka tanah sangat beragam. Karakteristik masing-masing jenis tanah dapat dipelajari dalam bidang ilmu Klasifikasi Tanah. Berikut ini akan dijelaskan peranan masing-masing faktor dalam pembentukan tanah.

6.1 Iklim

Iklim merupakan faktor utama yang mengatur laju dan jenis pembentukan tanah serta menjadi agen utama yang menentukan sebaran vegetasi dan jenis proses geomorfologi. Oleh karena itu iklim menjadi dasar klasifikasi fenomena alam, termasuk dalam klasifikasi tanah. Komponen iklim terutama suhu dan curah hujan sangat berpengaruh terhadap intensitas reaksi kimia dan fisika di dalam tanah selama proses pelapukan maupun setelah tanah terbentuk. Setiap kenaikan suhu 10°C maka kecepatan reaksi menjadi dua kali lipat. Reaksi-reaksi oleh mikroba di dalam tanah juga sangat dipengaruhi oleh suhu tanah. Iklim suatu tempat merupakan gambaran kondisi atmosfer yang berlaku, dan untuk lebih disederhanakan maka didefinisikan dalam bentuk rerata komponen iklim selama beberapa tahun. Data yang ideal untuk memprediksi kejadian iklim di suatu wilayah adalah data rerata akumulasi paling sedikit selama 35 tahun, terutama curah hujan dan suhu tahunan. Adanya curah hujan dan suhu tinggi di daerah tropika menyebabkan reaksi kimia berjalan cepat sehingga proses pelapukan dan pencucian berjalan cepat. Akibatnya banyak tanah di Indonesia telah mengalami pelapukan lanjut, kadar hara rendah, dan tanah umumnya bereaksi masam. Wilayah yang beriklim lebih kering seperti beberapa daerah di Indonesia Timur, misalnya NTT pencucian tidak berjalan intensif sehingga tanahnya relatif tidak masam, dan lebih tinggi kadar basanya.

Seperti telah dikemukakan bahwa, data yang menjadi dasar rerata komponen iklim biasanya diakumulasikan setidaknya selama 35 tahun untuk memperhitungkan perbedaan antar wilayah. Perbedaan data iklim antar wilayah atau zona, terkadang sangat besar dalam pola curah hujan dan suhu tahunan. Meskipun rerata paling sering digunakan, pola sebaran tahunannya, serta nilai ekstrem tidak boleh diabaikan, karena faktor penentu dan terkadang merupakan faktor penting. Namun perlu ditekankan bahwa data iklim atmosfer tidak selalu

memberikan gambaran iklim tanah yang sebenarnya. Misalnya, jumlah air di dalam tanah dapat sangat bervariasi dalam jarak beberapa meter dari permukaan batas jenuh permanen hingga kering dan mengalir cukup bebas, sedangkan pada kenyataannya tidak ada perbedaan antara jumlah total curah hujan di kedua lokasi tersebut. Lokasi yang satu mungkin berada dalam depresi di mana kelembapan dapat terakumulasi dan yang lainnya berada pada situasi yang sedikit lebih tinggi. Perbedaan rezim kelembapan di kedua lokasi ini secara teratur menyebabkan perkembangan tanah yang berbeda dan komunitas tanaman yang berbeda.

Data mengenai iklim tanah sangat sedikit terutama di wilayah Timur Indonesia, karena kesulitan yang dihadapi dalam melakukan pengukuran yang diperlukan di dalam tanah itu sendiri, dan seringkali kurangnya peralatan yang memadai. Dengan demikian banyak kesimpulan dibuat berdasarkan pengamatan sesekali tanpa dukungan pengukuran yang memadai atau berdasarkan ekstrapolasi menggunakan data iklim atmosfer. Terlepas dari kesulitan dan kekurangan ini, kita dapat membuat banyak pernyataan umum tentang iklim tanah dan dampaknya dengan menggunakan data atmosfer dan iklim tanah yang tersedia, ditambah dengan penalaran berdasarkan prinsip-prinsip kimia dan fisika. Iklim tanah mempunyai dua komponen utama yang sama dengan iklim atmosfer, yaitu suhu dan kelembapan (Patrick Fitz EA).

6.2 Bahan Induk

Berdasarkan jenis bahan dasar penyusun tanah yang disebut sebagai bahan induk dapat dibedakan atas dua kelompok yaitu : (1). Batuan Induk dan (2). Bahan Organik. Tanah yang terbentuk dari bahan dasar batuan akan menghasilkan tanah mineral, sedang tanah yang terbentuk dari bahan induk organik akan menghasilkan tanah organik atau Gambut. Mineral tanah adalah komponen utama bahan penyusun tanah, selain

bahan organik, air, dan udara. Dari abtuhan induk akan dihasilkan mineral tanah selama proses pelapukan. Mineral yang dihasilkan berupa mineral primer dan mineral sekunder melalui proses disintegrasi. Air, angin, suhu, gaya gravitasi akibat perbedaan letak, reaksi kimia, aktivitas organisme hidup dan perbedaan tekanan, semuanya bekerja sebagai satu kesatuan kekuatan untuk memecah bahan induk. Sifat tanah yang dihasilkan dari produk pelapukan sangat ditentukan oleh Jenis batuan induk dan kondisi penguraianya.. Misalnya, tanah yang terbentuk dari bahan induk yang didominasi granit seringkali berpasir dan tidak subur, sedangkan bahan induk bersifat basal dalam kondisi lembab akan membentuk tanah berwarna hitam yang subur dari hasil penguraian dan sintesis komponen kimia penyusunnya. Bahan induk tanah dapat berupa batuan dasar, bahan organik, permukaan tanah tua atau endapan air, bahan yang terbawa angin, gletser, dan gunung berapi (Tripathy et al., 2019). Faktor iklim, di antaranya curah hujan dan temperatur, dapat mengakibatkan batuan induk lebih 'lunak' sehingga lebih mudah mengalami proses pelapukan (Husnain dkk., 2003). Akibatnya tanah yang terbentuk pada setiap zone iklim memiliki jenis dan karakteristik yang berbeda meskipun berasal dari bahan induk yang sama.

Dalam proses pelapukan, tanah berkembang terus meskipun sifat-sifat bahan induk masih tetap terlihat. Pada tanah daerah beriklim tropika basah, tanah telah mengalami pelapukan sangat lanjut. Misalnya tanah-tanah bertekstur pasir adalah akibat dari kandungan pasir yang tinggi dari bahan induk. Susunan kimia dan mineral bahan induk tidak hanya mempengaruhi intensitas tingkat pelapukan, tetapi sering menentukan jenis vegetasi alami yang tumbuh di atasnya. Jika terdapat batu kapur di daerah humid, akan menghambat pH (kemasaman) tanah. Selain itu adanya vegetasi yang hidup di atas tanah berbatuan induk gamping atau batu kapur, biasanya

kation-kation basa seperti Ca, Mg, K, dan Na basa-basanya tinggi . Dengan adanya basa-basa yang dibebaskan selama proses pelapukan, pada lapisan tanah atas melalui serasah dari vegetasi tersebut, maka proses reaksi tanah yang bersifat masam akan lambat. Berdasarkan proses pembentukan batuan, dimana bahan induk tanah berasal, dapat dibedakan menjadi tiga kelompok yaitu (1) Batuan Beku; (2) Batuan Sedimen; (3) Batuan Metamorfosa (Malihan) (Sarwono, 2010). Berikut ini akan dibahas secara singkat ketiga kelompok batuan tersebut secara singkat.

(1). Batuan Beku

Magma yang membeku akan menghasilkan batuan beku. Batuan beku dapat dibedakan atas :

- a. Batuan beku atas : magma membentuk di permukaan bumi (batuan vulkanik).
- b. Batuan beku gang: magma menoreh retakan-retakan atau patahan-patahan dalam bumi dan membeku di antara sarang magma dan permukaan bumi.
- c. Batuan beku dalam : magma membentuk di dalam bumi.

(2) Batuan sedimen

Batuan sedimen terdiri dari bahan endapan (umumnya endapan laut) yang telah diendapkan berjuta tahun yang lalu hingga telah membentuk batuan yang keras. Beberapa contoh batuan endapan berumur tua adalah:

Batu gamping : merupakan endapan laut, banyak mengandung komponen yang bersumber dari karang laut, sebagian besar terdiri atas CaCO_3 (kalsit), dan $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomit).

Batu pasir : Banyak mengandung pasir kuarsa (SiO_2)

Batu liat : Batu liat ada yang bersifat masam, dan ada yang bersifat alkalis (contoh : shale/napal, dsb). Batuan ini mengandung kadar liat tinggi.

Bahan endapan baru : belum menjadi batu, diendapkan oleh air, misalnya di daerah dataran banjir, atau dataran alluvial; diendapkan oleh angin misalnya: pasir panati, loss, dan sebsgainya.

(3) Batuan metamorfosa (Malihan)

Batuan ini berasal dari batuan beku atau sedimen yang karena tekanan dan suhu tinggi berubah menjadi jenis batuan lain. Batuan metamorfosa umumnya bertekstur lembar (foliated texture) akibat rekristalisasi dari beberapa mineral dan orientasi mineral menjadi parallel sehingga terbentuk lembar-lembar. Batuan metamorfosa dengan lembar-lembar halus disebut schist (misalnya mika schist), sedangkan yang dengan lembar-lembar kasar disebut gneiss (misalnya granit gneiss). Batuan metamorfosa ada yang tidak menunjukkan foliated texture, misalnya kwarsit (dari batu pasir) dan marmer (dari batu kapur karbonat).

Bahan induk Organik

Sebagian daerah rawa yang sering tergenang terjadi proses akumulasi atau penumpukan bahan organik yang berasal dari vegetasi di atasnya atau yang terbawa akibat aliran air. Proses akumulasi bahan organik di cekungan cekungan hutan rawa lebih cepat dibandingkan dengan proses pengahncuran atau dekomposisi sehingga terbentuk tanah yang didominasi bahan organik, sehingga disebut tanah organik atau tanah gambut (Histosols). Tanah Histosols banyak ditemukan di pantai Timur Sumatera, Pantai Barat, Selatan, dan Timur Kalimantan, Pantai Utara dan Selatan Pulau Papua (Papua Selatan, Papua Barat, dan Papua Barat Daya). Klasifikasi batuan induk disajikan pada Tabel 1.

Tabel 6. 1. Klasifikasi batuan induk*.

Kelompok Batuan	Kelompok Mineral	Sifat dan Karakteristik Mineral	Sifat Tanah yang Terbentuk
Kristalin (di bawah permukaan, di bawah Regolith)	Granit	Merah jambu/kelabu muda; kuarsa, seperti pecahan kaca, tahan terhadap pelapukan; Feldspars/ berwarna pucat, Ferromagnesia berwarna kelam dan tidak tahan terhadap pelapukan	Fraksi agak kasar sampai halus, tekstur berrpasir, berliat, merah, lengket, subur
	Gabro	Hitam/kelabu tua, butiran kasar; Ferromagnesia dan Feldspars gelap, tanpa kuarsa	Berliat, merah, lengket, subur
	Basaltik	Hitam/kelabu tua, butiran kasar; Ferromagnesia dan Feldspars gelap, tanpa	Berliat, merah, lengket, subur

Kelompok Batuan	Kelompok Mineral	Sifat dan Karakteristik Mineral	Sifat Tanah yang Terbentuk
		kuarsa, butiran halus	
Sedimenter	Batuan Pasir (<i>Sandstone</i>) Batuan Lempeng (<i>Shale</i>) Batuan Gamping/ Batuan Kapur (<i>Limestone</i>)	Sedimen pasir dekat pantai; kuarsa direkat jadi satu Sedimen lumpur kelabu (agak jauh dari pantai): Kuarsa liat dan debu + feldspars Sedimen lumpur putih (sangat jauh dari pantai): butiran kapur	Tanah yang terbentuk umumnya belum berkembang lanjut. Fraksi agak kasar, lebih bervariasi akibat hasil sedimenasi.
Deposit Baru	Endapan Abu Vulkan Endapan Aluvial		

*Diadaptasi dari Singer dan Munns (1987); Harpstead dkk. (1988)

Jenis formasi dari bahan induk (Tripathy et al., 2019) dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- **Bahan induk sisa:** Seiring dengan pelapukan bahan induk, tanah berkembang in situ atau di tempat. Sumber

tanah ini terdapat di sepanjang punggung daerah pegunungan. Di daerah tropis, tanah yang terbentuk sangat tercuci dan teroksidasi.

- **Bahan induk aluvial:** Tanah berkembang di sepanjang aliran atau sistem sungai di dataran banjir, dataran aluvial, atau endapan delta. Tanah ini memiliki banyak penyortiran partikel. Partikel-partikel yang lebih halus disimpan dalam suspensi mengikuti aliran air.
- **Bahan induk koluvial:** Tanah terbentuk dari pecahan batuan yang jatuh dari ketinggian karena gaya gravitasi. Tanah ini kasar dan berbatu. Cara pembentukan tanah seperti ini biasa terjadi di sepanjang lereng gunung.
- **Endapan loess:** Tanah berkembang dari partikel-partikel yang diendapkan oleh angin. Partikel diurutkan berdasarkan ukurannya, karena angin membawa partikel terbaik ke jarak terjauh. Karena abu vulkanik sebagian besar terbawa dan diendapkan oleh aksi Aeolian (aktivitas dan kemampuan angin untuk mengikis, menyangkut, dan mengendapkan), maka proses ini paling banyak terjadi pada pembentukan tanah abu vulkanik.

Jika bahan induk mengandung mineral yang kaya akan unsur hara, maka akan menghasilkan tanah yang subur, sebaliknya bahan induk yang terdiri atas mineral yang kurang mengandung unsur hara, akan menghasilkan tanah yang tidak subur (Salam, 2020). Misalnya, tanah yang berkembang dari bahan induk dengan kandungan mineral apatit dalam jumlah tinggi maka akan menghasilkan tanah dengan kandungan unsur Ca dan P relatif tinggi. Pemahaman yang baik, terkait komposisi bahan induk tanah akan memberikan informasi tentang status kesuburan tanah, khususnya berkaitan dengan kemampuan penyangga tanah terhadap unsur hara tertentu. Wilayah dengan topografi berbukit akan ditemukan berbagai jenis tanah dengan berbagai tingkat perkembangan

daripada wilayah yang datar. Hal ini berkaitan dengan keragaman kadar air tanah karena proses erosi terjadi lebih intensif di wilayah berbukit. Kualitas bahan Induk umumnya ditentukan oleh komposisi mineral yang terkandung di dalamnya. Bahan induk tanah mineral terdiri dari tiga kelompok, yaitu Batuan yang bersifat kristalin, batuan yang terbentuk dari hasil sedimentasi atau disebut batuan sedimen, dan batuan deposit baru. Batuan yang bersifat kristalin atau disebut batuan kristalin mencakup granit, batuan gabro, dan batuan basaltik. Dari lapisan atas, umumnya batuan ini tidak terlihat karena terletak pada kedalaman tertentu. Batuan ini sering ditemukan atau berada di bawah lapisan Batuan pasir (*Sandstone*) atau Batuan Lempeng (*Shale*). Batuan yang bersifat kristalin ini, umumnya berada di bawah regolith. Istilah regolith adalah bagian batuan yang telah mengalami penghancuran, karena berbeda dengan batuan induknya. Hal ini disebabkan sebagian batuan tersebut telah mengalami sebagian perubahan fisik, kimia, dan biologi. Batuan ini dinamakan batuan kristalin karena kandungan mineral yang berbentuk Kristal sangat tinggi.

Seperti diungkapkan sebelumnya, batuan granit dapat dibedakan dengan batuan kristalin, karena perbedaan warna. Batuan granit lebih berwarna kemerahan atau kelabu muda dan terdapat butiran kuarsa disertai feldspar kristal yang berwarna lebih pucat. Tanah yang berkembang dari bahan induk yang mengandung granit, ditemukan partikel dengan berbagai ukuran dari ukuran kerikil dan pasir sampai liat sangat halus. Batuan granit sangat tahan terhadap pelapukan karena mengandung butiran kuarsa yang Nampak seperti pecahan kaca. Hal ini menyebabkan dalam tanah tersebut banyak ditemukan butiran pasir. Mineral lain di dalam batuan yang rentan terhadap proses pelapukan adalah mineral feldspars (berwarna pucat), dan mineral kalsium yang kaya besi dan magnesium

(mineral feromagnesia). Mineral-mineral tersebut akan berubah melalui pelapukan menjadi partikel liat halus.

Pada bagian akhir dari bahan induk tanah, penulis ingin menyampaikan tentang bahan induk tanah yang menghasilkan fosfat. Batuan ini berpotensi menghasilkan tanah yang kaya akan fosfat. Mineral utamanya adalah apatit. Batuan ini umumnya dijadikan bahan baku pupuk fosfat dengan persyaratan tertentu seperti kandungan fosfat minimal, kadar Al, Fe, dan tingkat kelarutannya. Batuan fosfat termasuk batuan sedimen. Secara khusus akan diuraikan tentang Tanah Inceptisols yang terjadi di Aayamaru, Papua Barat Daya dengan kandungan fosfat bervariasi berkisar 1 sampai 28%. Bahan induknya tidak berasal dari batuan fosfat yang mengandung mineral apatit, tetapi berasal dari batu gamping, dan bercampur dengan sedimen yang bersumber dari kotoran hewan seperti kelelawar, burung, dan hewan laut.

6.3 Organisme

Pengaruh organisme dalam proses pembentukann tanah tidaklah kecil. Akumulasi bahan organik, siklus unsur hara, dan pembentukan struktur tanah yang stabil sangat dipengaruhi oleh kegiatan organisme di dalam tanah. Disamping itu unsur nitrogen dapat diikat dari udara oleh mikroorganisme di dalam tanah baik yang hidup bebas maupun bersimbiosis dengan tanaman. Demikian juga vegetasi yang tumbuh di atas tanah tersebut dapat menjadi faktor penghalang terjadinya erosi, sehingga mengurangi jumla tanah permukaan yang hilang. Keberadaan flora, satwa liar, dan populasi manusia mungkin mempunyai dampak besar terhadap perkembangan tanah. Masuknya biotik yang berdampak pada pembentukan tanah juga mencakup manusia. Seluruh sampel tanah dapat hilang

seluruhnya atau terendam (akibat urbanisasi), atau dampak yang ditimbulkan oleh manusia dapat terjadi secara bertahap seperti perubahan lambat pada bahan organik melalui pertanian atau perubahan struktur tanah melalui irigasi. Tradisi budaya seringkali mempunyai dampak yang signifikan terhadap karakteristik fisik dan kimia tanah yang penting bagi pertumbuhan tanaman (Williams, 2023). Secara umum di daerah beriklim sedang, seperti di Eropa dan Amerika, pengaruh jenis vegetasi terhadap sifat tanah adalah sangat nyata. Vegetasi hutan membentuk tanah-tanah hutan berwarna merah, sedangkan vegetasi rumput membentuk tanah berwarna hitam, karena banyaknya sisa-sisa bahan organik yang tertinggal dari akar-akar dan sisa rumput.

Organisme hidup seperti tanaman (tajuk maupun akar), bakteri, jamur, cacing tanah, semut, marmut, dan makhluk hidup lainnya membantu pembentukan setiap bagian dari tanah. Tanaman dan organisme menambah bahan organik dan humus di dalam tanah serta mempercepat pelapukan partikel tanah. Hewan tanah tertentu seperti cacing tanah juga berperan dalam mencampur bahan anorganik berupa partikel tanah dengan berbagai bahan organik berupa humus yang berasal dari makhluk hidup. Kandungan unsur-unsur kimia yang terdapat pada tanaman juga sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat tanah. Jenis-jenis cemara akan memberikann kation-kation logam seperti Ca, Mg, dan K yang rendah. Siklus unsur hara di bawah tanaman-tanaman tersebut adalah rendah dibandingkan dengan tanaman berdaun lebar, dimana serasahnya lebih banyak mengandung basa-basa. Akibatnya tanah di bawah pohon pinus, biasanya lebih masam daripada tanah di bawah pohon jati, dan lainnya. Pencucian basa-basa biasanya di bawah pohon pinus lebih intensif. Pembentukan tanah dipengaruhi oleh organisme dan mikroorganisme, serangga penggali, hewan dan manusia. Ketika tanah terbentuk, tanaman mulai tumbuh di

dalamnya. Tanaman menjadi dewasa dan mati dan digantikan oleh tanaman baru. Daun dan akarnya ditambahkan ke tanah. Hewan memakan tumbuh-tumbuhan dan kotorannya dan akhirnya bangkai mereka dimasukkan ke dalam tanah, sehingga mempengaruhi mengubah raksi tanah. Bakteri, jamur, cacing, dan penggali lainnya memecah sampah tanaman dan sisa kotoran hewan menjadi humus yang menambah unsur hara penting bagi tanah. Setiap tanah mempunyai kombinasi hasil aktivitas mikroorganisme/mikrob yang unik. Mikroorganisme khususnya mempengaruhi transformasi mineral. Selain itu, beberapa bakteri dapat mengikat nitrogen di atmosfer dan mengambil bagian dalam siklus biogeokimia. Beberapa jamur juga efisien dalam mengekstraksi fosfor tanah dalam dan meningkatkan tingkat karbon tanah (Tripathy et al., 2019).

6.4 Topografi

Faktor tpembentukan tanah lainnya adalah Topografi atau relief. Topografi adalah perbedaan tinggi atau bentuk wilayah suatu daerah termasuk di dalamnya perbedaan kecuraman dan bentuk lereng. Proses pembentukan tanah dipengaruhi relief melalui 3 cara yaitu:: (1) Topografi mempengaruhi banyaknya volume air hujan yang meresap atau ditahan oleh masa tanah, (2) Mempengaruhi kedalaman air tanah, (3) Mempengaruhi terjadinya dan laju erosi, serta (4) Mengendalikan aliran air dan sedimen yang terangkut serta terlarut di dalamnya. Topografi (bentuk wilayah, atau relief) suatu daerah dapat memperlambat dan meningkatkan pengaruh iklim terhadap proses pembentukan tanah lainny. Topografi yang datar atau cekung sehingga menghambat pergerakan dan aliran air (air cenderung tergenang), atau tidak mudah hilang dari tanah atau permeabilitasnya lambat, pengaruh iklim menjadi

tidak jelas dan terbentuklah lapisan tanah berwarna keabuan, dengan adanya karatan sebagai akibat reaksi oksidasi reduksi. Posisi lahan, dengan derajat kemiringan sangat mempengaruhi tingkat perkembangan tanah, karena menghambat horisonisasi. Proses ini disebut pedoturbasi dan memengaruhi pelapukan bahan induk (Husnain dkk., 2003). Wilayah berbukit memiliki lebih banyak jenis tanah daripada wilayah yang datar, berkaitan dengan variasi kadar air tanah dan lebih intensifnya proses erosi di wilayah berbukit.

Tanah dengan topografi bergelombang, drainasenya lebih baik sehingga pengaruh iklim (curah hujan, suhu) lebih jelas, pelapukan serta proses pencucian atau pelindian lebih cepat. Daerah dengan topografi berlereng curam, sering terjadi erosi permukaan yang intensif atau terjadi terus menerus, terutama di daerah humid sehingga terbentuklah tanah-tanah dangkal. Sebaliknya, pada kaki-kaki lereng tersebut sering ditemukan tanah dengan profil yang dalam akibat penimbunan bahan-bahan yang terbawa saat erosi dari lereng atas. Sifat-sifat tanah yang berhubungan dengan relief adalah tebal dan kandungan bahan organik pada horizon A, tebal solum, kadar lengas (relative wetness), kecerahan warna tanah, tingkat perkembangan horizon, reaksi tanah (pH), kejenuhan basa, kandungan garam mudah larut, dan lain-lain.

6.5 Waktu

Tanah adalah sumber daya alam yang bersifat dinamis, karena terus-menerus berubah seiring dengan waktu dan proses yang terjadi akibat faktor lingkungan dimana tanah tersebut terbentuk. Secara alami tanah mengalami proses perkembangan akibat faktor pembentuknya, dan aspek pengelolaan. Tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut seperti tanah Ultisols,

dan Oxisols tidak subur, karena pelapukan insentif dan pelindian yang terus-menerus maka tanah semakin kurus atau tidak subur. Mineral yang banyak mengandung hara telah terlindi/tercuci selama proses pelapukan. Mineral yang sukar melapuk atau tahan terhadap pelapukan adalah kuarsa. Dengan meningkatnya umur selama proses pelapukan, maka profil tanah semakin berkembang. Berdasarkan perbedaan umur pelapukan yang tercermin dari perubahan bahan induk tanah, maka berturut turut dapat ditemukan tanah dengan tingkat perkembangan : (1) tanah muda (immature atau young soil), tanah dewasa (mature soil), dan tanah tua (Old Soils). Contoh tanah muda yang terbentuk dari sedimentasi berbahan induk gamping yang kaya akan unsur fosfor di Distrik Aymaru, Kabupaten Maybrat. Tanah tersebut belum belum berkembang , dan kandungan Ca, Mg, Ka, dan Na cukup tinggi.

Contoh Uraian profilnya disajikan pada tabel 3 dan Gambar 1.

Tabel 6. 2. Uraian Profil Tanah Inceptisols di Ayamaru, Papua Barat Daya

No.	Kedalaman(cm)	Horison	Uraian
1.	0 – 20	A1	10 YR 3/2 (Coklat kelabu), geluh debuan, granular, halus, lemah, agak lekat, agak teguh, perakaran sedikit; pH 6,2.; P-Bray I 140 ppm.
2.	20 - 45	A2	Coklat tua kekuningan (10 YR 4/4), lempung debuan, Gumpal, halus, lemah, lekat, sangat teguh; pH 6,2; P-Bray I 160 ppm.
3.	45 – 80	BA	Coklat kekuningan (10 YR 5/4),

No.	Kedalaman(cm)	Horison	Uraian
			lempung, Gumpal, sedang, sangat lekat, sangat teguh, pH 6,7, P-Bray I 180 ppm.
4.	80 – 120	BC	Coklat kekuningan (10 YR 5/8), lempung, gumpal, sedang, sangat lekat, sangat teguh, terdapat fragmen kapur

Inceptisol adalah tanah yang belum matang (*immature*) dengan perkembangan profil yang lebih lemah dibandingkan dengan tanah matang, dan masih banyak menyerupai sifat bahan induknya. Tanah Inceptisol Ayamaru dapat diduga arah perkembangannya membentuk tanah Alfisol. Hasil analisis Kejenuhan Basa lebih besar dari 35% pada kedalaman 120 cm . Profil Tanah Inceptisol Ayamaru yang disebut Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru, disajikan pada Gambar 6.1.



Gambar 6. 1. Profil Tanah Inceptisols di Ayamaru, Maybrat Papua Barat Daya

Proses pembentukan tanah yang terus berjalan maka bahan induk tanah berubah menjadi tanah berumur muda (*immature* atau *young soil*; tanah dewasa (*mature soil*), dan tanah tua (*Old soils*).

Tanah muda; Proses pembentukan yang menghasilkan tanah muda, terutama dalam proses pelapukan bahan organik dan bahan mineral, pencampuran bahan organik dan bahan mineral di permukaan tanah dan pembentukan struktur tanah karena pengaruh bahan organik tersebut. Hasilnya adalah pembentukan horizon A dan horizon C. Secara keseluruhan sifat tanah masih didominasi oleh sifat-sifat bahan induknya. Tanah

muda yang penyebarannya sangat luas adalah tanah Aluvial dan Regosol (klasifikasi PPT, 2003).

Tanah dewasa : Proses pembentukan tanah yang lebih lanjut karena factor waktu, maka tanah-tanah muda akan berubah menjadi tanah dewasa dengan dicirikan dengan pembentukan horizon B yang masih muda (Bw) sebagai hasil dari proses alterasi bahan induk (terbentuk struktur tanah, warna lebih merah dari bahan induk) atau ada penambahan bahan-bahan tertentu (fraksi liat, dan lain-lain). Dalam jumlah sedikit dari lapisan atas. Pada fase ini tanah mempunyai kemampuan berproduksi tinggi, karena unsur hara cukup tersedia atau belum banyak yang terlindi (tercuci). Jenis tanah yang termasuk dalam tingkat ini antara lain: Inceptisols, (Latosol, sebagaian Aluvial, Andisols, Vertisols, Mollisols, dan sebagainya).

Tanah berpelapukan sangat lanjut/ tanah tua: dengan bertambahnya waktu, maka semakin lama proses pelapukan terus berlanjut sehingga pembentukan tanah lebih intensif, karena terjadi perubahan-perubahan yang lebih nyata pada horizon A dan B, dan terbentuklah horison A, E, EB, BE, Bt, BC, dan sebagainya. Selain itu hasil pelapukan mineral dan pencucian basa-basa semakin meningkat sehingga yang tersisa adalah mineral-mineral yang resisten di dalam tanah, sehingga tanah tersebut bereaksi masam, dan sangat tidak subur. Proses pembentukan tanah tersebut berlangsung lama sehingga dicirikan dengan adanya horizon Aargilk, dan Oxic. Jenis-jenis tanah yang sudah berkembang lanjut dan termasuk tanah tua adalah: Ultisols (Podsolik Merah Kuning) dan Oxisols.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, M., Darmawan Putri, N., Sandrawati, A., Rachmat Harryanto, dan, Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, D., Pertanian Universitas Padjadjaran, F., Program Studi Agroteknologi, A., & Pertanian Universitas Padjadjaran Jl Raya Bandung Sumedang Km, F. (2018). *Pengaruh Posisi Lereng terhadap Sifat Fisika dan Kimia Tanah pada Inceptisols di Jatinangor* (Vol. 16, Issue 2).
- Soil Survey Staff. (1992). *Kunci Taksonomi Tanah* (Subagjo (ed.); I, Vol. 6). Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Tripathy, B., Raha, S., & Professor, A. (2019). *Thematics Journal of Geography Formation Of Soil*. <https://www.researchgate.net/publication/335524720>
- Williams, V. (2023). *The role of geography, climate, and organisms in soil development*. <http://www.internationalscholarsjournals.com/>
- Arifin, M., Darmawan Putri, N., Sandrawati, A., Rachmat Harryanto, dan, Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, D., Pertanian Universitas Padjadjaran, F., Program Studi Agroteknologi, A., & Pertanian Universitas Padjadjaran Jl Raya Bandung Sumedang Km, F. (2018). *Pengaruh Posisi Lereng terhadap Sifat Fisika dan Kimia Tanah pada Inceptisols di Jatinangor* (Vol. 16, Issue 2).
- Soil Survey Staff. (1992). *Kunci Taksonomi Tanah* (Subagjo (ed.); I, Vol. 6). Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Tripathy, B., Raha, S., & Professor, A. (2019). *Thematics Journal of Geography Formation Of Soil*. <https://www.researchgate.net/publication/335524720>
- Williams, V. (2023). *The role of geography, climate, and organisms in soil development*. <http://www.internationalscholarsjournals.com/>

- Arifin, M., Darmawan Putri, N., Sandrawati, A., Rachmat Harryanto, dan, Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, D., Pertanian Universitas Padjadjaran, F., Program Studi Agroteknologi, A., & Pertanian Universitas Padjadjaran Jl Raya Bandung Sumedang Km, F. (2018). *Pengaruh Posisi Lereng terhadap Sifat Fisika dan Kimia Tanah pada Inceptisols di Jatinangor* (Vol. 16, Issue 2).
- Soil Survey Staff. (1992). *Kunci Taksonomi Tanah* (Subagjo (ed.); I, Vol. 6). Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Tripathy, B., Raha, S., & Professor, A. (2019). *Thematics Journal of Geography Formation Of Soil*.
<https://www.researchgate.net/publication/335524720>
- Williams, V. (2023). *The role of geography, climate, and organisms in soil development*.
<http://www.internationalscholarsjournals.com/>

BIODATA PENULIS



Ria Megasari, S.P., M.P

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian dan Ilmu Perikanan Universitas Pohnomo

Penulis lahir pada tanggal 4 Juni 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian dan Ilmu Perikanan, Universitas Pohnomo. Penulis selain mengajar juga aktif melakukan penelitian sejak tahun 2019. Penelitian yang telah dilakukan memiliki judul sebagai berikut: Inventarisasi Hama dan Penyakit Tanaman Jagung (*Zea mays* L.) dan Pengendaliannya di Kec. Taluditi Kab. Pohnomo (2019); Uji Beberapa Jenis Sistem Tanam Terhadap Produktivitas Padi Ponelo Lokal Gorontalo (2020). Pemanfaatan lahan Sempit Melalui Sistem Tanam Hidroponik dalam Menunjang Kebutuhan Sayuran Di Era Covid-19 (2021); Peran Mikoriza Terhadap Pertumbuhan dan Produksi tanaman Jagung Pulut Manis (*Zea mays* L. Saccharta) (2022); Perbaikan Karakter Umur Padi Lokal "Siam Kuning" melalui Pemuliaan Mutasi Sinar Gamma (2023). Buku yang telah diterbitkan Sistem Pertanian Terpadu: Pertanian Masa Depan (2022); Budidaya tanaman Semusim dan Tahunan (2022); Teknologi dan Produksi Benih (2023); Hortikultura (2023); Fisiologi Tumbuhan (2023); Agroklimatologi (2024).

BIODATA PENULIS



Indra Permana, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Siliwangi

Penulis lahir di Jakarta tanggal 11 Nopember 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian, Universitas Siliwangi. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Tanah di Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Penulis menekuni penelitian di bidang kesuburan tanah dan nutrisi tanaman sejak penyusunan skripsi, tesis, bahkan hingga saat ini. Fokus topik yang diteliti yakni formulasi dan produksi pupuk multifungsi yang berperan sebagai pupuk lepas lambat sekaligus remediator logam berat pada tanah-tanah tercemar. Penulis memiliki pengalaman kerja sebagai peneliti sejak tahun 2016 hingga saat ini. Sebelum bekerja sebagai dosen, penulis merupakan peneliti di salah satu research center perkebunan kelapa sawit Sinarmas yaitu Smart Research Institute. Pengalaman yang cukup lama sebagai peneliti memberikan kontribusi dalam menyusun bahan ajar bagi para mahasiswa di fakultas pertanian Universitas Siliwangi.

BIODATA PENULIS



Amin Mbusango, SP., MP.

Dosen Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Papua.

Penulis lahir di Bau-bau 07 Agustus 1991. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Papua. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian Universitas Halu Oleo dan melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Penulis menekuni bidang Biodiversitas tanah, dan Bioteknolog Tanah. Karir dimulai sebagai dosen tetap di Fakultas Pertanian Universitas Papua sejak tahun 2022 hingga saat ini. Penulis telah menerbitkan buku dengan judul Persiapan SKB (Seleksi Kompetensi Bidang) Bagi CPNS Dosen dan menjadi penulis pada buku Teknologi Budidaya Tanpa Tanah.

BIODATA PENULIS



Muhammad Fahyu Sanjaya, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroekoteknologi

Fakultas Pertanian dan Kehutanan Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir pada 7 April 1994 di Kota Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara, Indonesia. Saat ini ia sedang aktif sebagai dosen di program studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian dan Kehutanan Universitas Sulawesi Barat. Beliau menamatkan sekolah program sarjana (S1) di Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Halu Oleo dan lulus pada tahun 2016, kemudian pada tahun 2017 melanjutkan sekolah di program pascasarjana (S2) program studi Agronomi universitas Halu Oleo dan lulus pada tahun 2020. Selama masa kuliah beliau dikenal aktif dalam berbagai riset dibidang pertanian, dan menjadi asissten Dosen di Laboratorium Pertanian Unit Biodiversitas Tanah. Beliau juga telah beberapa kali bertugas sebagai seorang tenaga pengajar, yaitu pernah menjadi Dosen di Universitas Amal ilmiah Yapis Wamena, Provinsi Papua pada tahun 2021. Selain itu beliau juga pernah menjadi tim ahli tanah dalam pembuatan surat izin kegiatan dalam aspek lingkungan pada tahun 2017. Selama menjadi akademisi fokus

penelitian beliau adalah tentang biodiversitas tanah yaitu bagaimana meningkatkan ketersediaan unsur hara pada media tanam dengan memanfaatkan organisme tanah. Sedangkan saat ini beliau sedang fokus dalam riset-riset pengembangan komoditi lokal yang ada di Sulawesi Barat. Beberapa artikel mengenai bidang beliau telah dipublikasi pada berbagai jurnal bereputasi.

BIODATA PENULIS



Ir. Edy Syafril Hayat, MP

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian, Sains dan Teknologi
Universitas Panca Bhakti

Penulis lahir di Sambas tanggal 5 Mei 1968. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian, Sains dan Teknologi Universitas Panca Bhakti sejak tahun 1993 . Menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Tanjungpura pada tahun 1992 dan menyelesaikan S2 di Program Studi Ilmu Tanah Universitas Padjadjaran dengan Bidang Kajian Utama Kesuburan Tanah dan Gizi Tanaman pada tahun 2004. Telah melakukan beberapa penelitian terkait kesuburan tanah dan pemanfaatan bahan pembenah tanah pada lahan suboptimal sejak tahun 2014- sekarang, dengan luaran berupa buku dengan judul : **Inovasi Teknologi Biochar dan Bokashi pada Tanaman Kedelai di Tanah Suboptimal Basah Secara Berkelanjutan** (Maret, 2024), dan buku : **Biokompos Kunci Pengelolaan Lahan Suboptimal** (Maret, 2024).

BIODATA PENULIS



Dr.Ir. Ishak Musaad, M.P

Dosen Program Studi Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis lahir di Fakfak, 16 Februari 1963. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Ilmu Tanah, Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian, Universitas Papua (Unipa) Manokwari, sejak Tahun 1989. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Budidaya Pertanian Faperta Universitas Cenderawasih di Manokwari (Saat ini adalah Universitas Papua) pada tahun 1988. Menyelesaikan Program S2 pada Program Studi Ilmu Tanah Universitas Gadjah Mada, dengan minat utama Kimia dan Kesuburan Tanah. Penulis menyelesaikan Program Doktor pada Program Studi Ilmu Tanah dalam bidang kajian utama Kesuburan Tanah dan Gizi Tanaman pada Program Pascasarjana Universitas Padjadjaran (2009). Penulis telah melakukan berbagai penelitian dalam bidang Ilmu Tanah baik yang dibiayai oleh Kemendikbudristek, maupun Pemerintah Daerah Provinsi Papua, dan Papua Barat. Salah satu hasil penelitian yang telah memperoleh paten (ID P003011) dengan judul: Rekayasa Teknologi Pupuk Fosfat Cair dari Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru dan Bahan Organik (2012). Luaran lain adalah buku dengan judul: **Potensi dan Pemanfaatan Fosfat Alam Sebagai Pupuk Fosfat-Plus (2018).**

