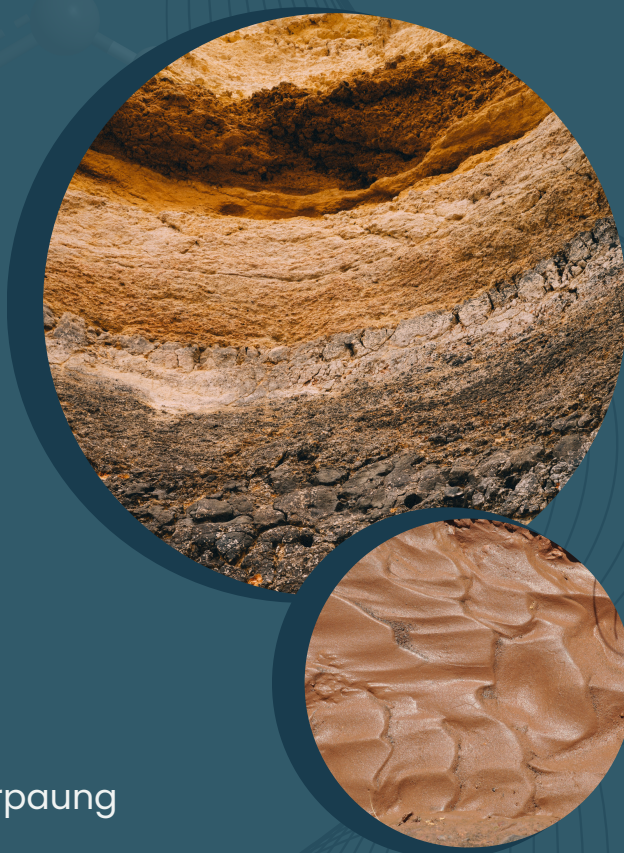


SIFAT-SIFAT KIMIA TANAH

Penulis:

- Edy Syafril Hayat
- Ismail Astar
- Sjamsiah
- Merpiseldin Nitsae
- Nani Kitty Sihaloho
- Waode Rustiah
- Eso Solihin
- Ida Ayu Suci
- Mauritz Pandapotan Marpaung
- Anselmus Boy Baunsele
- Mulyadi
- Abdi Suprayitno
- Aliyah Fahmi



ISBN 978-623-125-698-0



9

786231

256980

SIFAT-SIFAT KIMIA TANAH

**Edy Syafril Hayat
Ismail Astar
Sjamsiah
Merpiseldin Nitsae
Nani Kitti Sihaloho
Waode Rustiah
Eso Solihin
Ida Ayu Suci
Mauritz Pandapotan Marpaung
Anselmus Boy Baunsele
Mulyadi
Abdi Suprayitno
Aliyah Fahmi**



GETPRESS INDONESIA

SIFAT-SIFAT KIMIA TANAH

Penulis :

Edy Syafril Hayat
Ismail Astar
Sjamsiah
Merpiseldin Nitsae
Nani Kitti Sihaloho
Waode Rustiah
Eso Solihin
Ida Ayu Suci
Mauritz Pandapotan Marpaung
Anselmus Boy Baunsele
Mulyadi
Abdi Suprayitno
Aliyah Fahmi

ISBN: 978-623-125-698-0

Editor : Mila Sari, M.SI.

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

Penerbit: GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tengah, Padang, Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Maret 2025

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

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya, maka Penulisan Buku dengan judul *Sifat-Sifat Kimia Tanah* dapat diselesaikan dengan kerjasama tim penulis. Sifat-Sifat Kimia Tanah merupakan buku berisikan bahasan mengenai tingkat keasaman (pH) tanah, koloid tanah, kapasitas tukar kation (KTK), kejenuhan basa, unsur – unsur hara esensial tanah, mekanisme penyediaan dan penyerapan unsur hara, unsur fosfor dalam tanah, unsur kalium dalam tanah, unsur nitrogen dalam tanah, unsur belerang dalam tanah, dan unsur-unsur mikro kimia tanah.

Buku ini masih banyak kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kritik dan saran demi perbaikan dan kesempurnaan buku ini selanjutnya. Kami mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Buku ini. Semoga Buku ini dapat menjadi sumber referensi dan literatur yang mudah dipahami.

Padang, Maret 2025
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
BAB 1 TINGKAT KEASAMAN (pH) TANAH.....	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Pengertian pH Tanah	3
1.3 Bahan-bahan untuk Meningkatkan pH Tanah	7
1.4 Penyebab Kemasaman Tanah	20
1.5 Menghitung Kebutuhan Kapur.....	24
DAFTAR PUSTAKA	27
BAB 2 KOLOID TANAH	31
2.1 Pendahuluan	31
2.2 Pengertian Koloid Tanah.....	32
2.2 Filosilikat	34
2.2.1 Substitusi Isomorfik.....	38
2.2.2 Mineral Oksida-Hidroksida.....	44
2.2.3 Koloid Organik (Humus).....	45
2.3 Muatan pada Koloid Tanah.....	46
2.4 Pengaruh Koloid Tanah terhadap Sifat Tanah.....	47
2.5 Pertukaran Kation Di Tanah	49
2.6 Adsorpsi Dan Pertukaran Anion.....	51
DAFTAR PUSTAKA	54
BAB 3 KAPASITAS TUKAR KATION (KTK).....	55
3.1 Pendahuluan	55
3.1.1 Pentingnya KTK dalam Ilmu Tanah.....	55
3.1.2 Peran KTK dalam Kesuburan Tanah dan Ketersediaan Hara	55
3.2 Konsep Dasar Kapasitas Tukar Kation.....	56
3.2.1 Pengertian dan Satuan KTK.....	56
3.2.2 Prinsip Pertukaran Ion dalam Tanah.....	57
3.2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi KTK	57
3.3 Material Penyusun Tanah dan Kapasitas Tukar Kation (KTK)	59
3.2.1 Peran Mineral Liat dalam KTK	59
3.3.1 Bahan Organik dan Hubungannya dengan KTK	59
3.3.2 Pengaruh Jenis Mineral dan Ukuran Partikel	60
3.4 Jenis-jenis Kation dalam Pertukaran.....	60
3.4.1 Kation utama dalam tanah	60

3.4.2 Kation Esensial vs Kation Tidak Esensial	61
3.4.3 Interaksi Kation dengan Koloid Tanah.....	61
3.5 Metode Pengukuran KTK.....	62
3.5.1 Metode Analisis Laboratorium	62
3.5.2 Teknik Ekstraksi Kation	62
3.5.3 Interpretasi Hasil Pengukuran.....	63
3.6 Pengaruh KTK terhadap Kesuburan Tanah	63
3.6.1 Hubungan KTK dengan Ketersediaan Unsur.....	63
3.6.2 Peran KTK dalam Mengurangi Kehilangan Unsur Hara Akibat Pencucian	64
3.6.3 Implikasi dalam Manajemen Pemupukan	65
3.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi KTK	66
3.7.1 pH Tanah dan Dampaknya terhadap KTK.....	66
3.7.2 Tekstur Tanah dan Kandungan Bahan Organik	67
3.7.3 Aktivitas Mikroorganisme dalam Meningkatkan atau Menurunkan KTK	68
3.8 Aplikasi dalam Manajemen Tanah	69
3.8.1 Pengelolaan Tanah untuk Meningkatkan KTK	69
3.8.2 Teknik Perbaikan Tanah dengan Bahan Organik dan Mineral Tambahan	70
3.8.3 Dampak Pengolahan Tanah Terhadap KTK.....	71
DAFTAR PUSTAKA	73
BAB 4 KEJENUHAN BASA	75
4.1 Pengenalan Dasar Teori Kejenuhan Basa	75
4.2 Rasio Kejenuhan Basa sesuai Metode Base Cation Saturation Ratio (BCSR).....	78
4.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kejenuhan Basa.....	80
4.3.1 pH Tanah	80
4.3.2 Kapasitas Tukar Kation (KTK/ CEC).....	81
4.3.2 Kandungan Bahan Organik.....	81
4.3.2 Pemupukan.....	81
4.4 Pengukuran dan Analisis Kejenuhan Basa.....	82
4.4 Studi Kasus dan Aplikasi Kejenuhan Basa	84
DAFTAR PUSTAKA	87
BAB 5 UNSUR – UNSUR HARA ESENSIAL TANAH.....	89
5.1 Pendahuluan.....	89
5.1.1 Defenisi dan Kriteria Esensialitas Unsur Hara bagi Tanaman.....	89
5.1.2 Kriteria Esensialitas Unsur Hara.....	91
5.2 Makronutrien Esensial	91

5.3 Mikronutrien Esensial	97
5.4 Peran dan Fungsi dalam Tanaman	101
5.5 Interaksi Antar Unsur Hara	107
5.6 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Unsur Hara	114
5.7 Diagnosa Kekurangan dan Keracunan Unsur Hara	115
DAFTAR PUSTAKA	118
BAB 6 MEKANISME PENYEDIAAN DAN PENYERAPAN	
UNSUR HARA	119
6.1 Pendahuluan	119
6.2 Akar sebagai Organ Utama Penyerap Nutrisi.....	120
6.3 Peranan Mikoriza dalam Tumbuhan	121
6.4 Kondisi Tanah dan Ketersediaan Nutrisi	124
6.5 Lintasan Pergerakan Hara Pada Jaringan Akar	125
6.6 Prinsip Penyerapan Hara oleh Tanaman	128
6.6.1 Membran Sel yang Tidak Aktif Secara Metabolik Atau Mati, Akan Menjadi Lebih Mudah Dilewati oleh Bahan Terlarut	128
6.6.2 Molekul Air dan Gas Terlarut Dapat Menembus Membrane dengan Mudah	128
6.6.3 Zat Terlarut yang Bersifat Hidrofobik Menembus Membrane Sesuai dengan Kelarutannya dalam Lemak	129
6.6.4 Ion dan Molekul Hidrofilik Menembus Membrane Dengan Kemudahan yang Berbanding Terbalik dengan Ukurannya ...	129
6.7 Karakteristik Penyerapan Hara oleh Tanaman	129
6.7.1 Spesifitas Penyerapan Hara.....	130
6.7.2 Penyerapan Aktif dan Pasif.....	130
6.7.3 Kompetisi Antar Ion dalam Penyerapan	131
6.7.4 Ketersediaan Hara di Zona Perakaran	131
6.7.5 Faktor yang Mempengaruhi Penyerapan Hara.....	132
6.7.6 Mobilitas Hara di Dalam Tanaman	133
6.8 Mekanisme Penyerapan Hara oleh Tanaman	133
6.8.1 Aliran Massa (Mass Flow)	134
6.8.2 Difusi.....	134
6.8.3 Intersepsi Akar (Root Interception).....	135
6.7 Perbandingan Ketiga Mekanisme Serapan Hara.....	136
DAFTAR PUSTAKA	138
BAB 7 UNSUR FOSFOR DALAM TANAH	139
7.1 Pendahuluan	139
7.2 Sumber Fosfor dalam Tanah.....	141

7.3 Transformasi Fosfor Dalam Tanah	148
7.4 Fraksi Fosfor Dalam Tanah	150
7.4.1 P-Anorganik	152
7.4.2 P-Organik	160
7.4 Faktor Yang Memengaruhi Fosfor Dalam Tanah	164
DAFTAR PUSTAKA	168
BAB 8 UNSUR KALIUM DALAM TANAH	171
8.1 Sifat dan Peranan Kalium dalam Tanah	172
8.2 Bentuk-bentuk Kalium dalam Tanah	174
8.3 Sumber dan Ketersediaan Kalium untuk Tanaman	178
8.4 Pupuk Kalium dan Strategi Pemupukan	181
8.5 Peran Kalium dalam Produktivitas dan Ketahanan Tanaman	183
BAB 9 UNSUR MAGNESIUM DALAM TANAH	189
9.1 Pendahuluan	189
9.2 Sifat Fisika dan Sifat Kimia Magnesium	190
9.2.1 Sifat Fisika Magnesium	190
9.2.2 Sifat Kimia Magnesium	191
9.3 Sumber Magnesium dalam Tanah	191
9.4 Faktor-Faktor Mempengaruhi Ketersediaan Magnesium dalam Tanah	193
9.5 Gejala Defisiensi Magnesium dan Toksisitas pada Tanaman	194
9.6 Strategi Pengelolaan dalam Mengoptimalkan Ketersediaan Magnesium di Berbagai Jenis Tanah Pertanian	196
DAFTAR PUSTAKA	198
BAB 10 UNSUR KALSIMUM DALAM TANAH	201
10.1 Pengantar tentang Kalsium	201
10.2 Sumber Kalsium	205
10.3 Kebutuhan Harian	207
10.4 Keberadaan Kalsium di Tanah	210
10.4.1 Fungsi Utama Kalsium dalam Tanah	210
10.4.2 Sumber Kalsium di Tanah	212
10.4.3 Siklus Kalsium	214
10.4.4 Fungsi dan Peran Kalsium dalam Proses Pertukaran Ion	216
10.4.5 Faktor yang Mempengaruhi Pertukaran Ion	220
10.5 Kalsium dan Tanaman	221
10.5.1 Fungsi Kalsium bagi Tanaman	221
10.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Kalsium	229
10.5.3 Pengaruh Praktik Pertanian pada Kalsium Tanah	234
10.5.4 Pengelolaan Kalsium pada Tanah Asam dan Alkalin	237

DAFTAR PUSTAKA	241
BAB 11 UNSUR NITROGEN DALAM TANAH	243
11.1 Pentingnya Nitrogen Bagi Tumbuhan	243
11.1.1 Peran Nitrogen dalam Pertumbuhan Tanaman	243
11.1.2 Siklus Nitrogen	245
11.1.3 Defisiensi Nitrogen	245
11.2 Sumber Nitrogen di Tanah, Proses Fiksasi, dan Dampaknya	246
11.2.1 Sumber Nitrogen di Tanah	246
11.2.2 Proses Fiksasi Nitrogen	246
11.2.3 Berbagai Jenis Pupuk Nitrogen	247
11.2.4 Peran Legum dan Bakteri Pengikat Nitrogen	248
11.2.5 Mineralisasi Bahan Organik	248
11.2.6 Dampak Terhadap Lingkungan	249
11.3 Proses Transformasi Nitrogen dalam Tanah	249
11.3.1 Mineralisasi	249
11.3.2 Nitrifikasi	250
11.3.3 Imobilisasi	250
11.3.4 Denitrifikasi	250
11.3.5 <i>Leaching</i>	250
11.3.6 Faktor yang Mempengaruhi Transformasi Nitrogen	251
11.3.7 Pentingnya Memahami Transformasi Nitrogen	251
11.4 Faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Nitrogen dalam Tanah	251
11.4.1 Jenis Tanah	252
11.4.2 Iklim	252
11.4.3 Pengolahan Tanah	253
11.4.5 Interaksi Antar Faktor	254
11.4.6 Pentingnya Mengelola Ketersediaan Nitrogen	254
11.5 Pengelolaan Nitrogen yang Berkelanjutan	255
11.5.1 Strategi Pengelolaan Nitrogen Berkelanjutan	255
11.5.2 Pemantauan Ketersediaan Nitrogen	257
DAFTAR PUSTAKA	258
BAB 12 UNSUR BELERANG DALAM TANAH	259
12.1 Pendahuluan	259
12.2 Distribusi Belerang di Dalam Tanah	261
12.3 Sifat Kimia dan Biologi Belerang dalam Tanah	262
12.3.1 Bentuk-bentuk Belerang dalam Tanah	264
12.3.2 Transformasi Belerang dalam Tanah	265
12.4 Sifat Kimia dan Biologi Belerang dalam Tanah	266
12.5 Peran Belerang Didalam Tanah	267

12.6 Dampak Lingkungan dari pengelolaan Belerang.....	268
DAFTAR PUSTAKA	270
BAB 13 UNSUR-UNSUR MIKRO KIMIA TANAH	275
13.1 Pendahuluan Tentang Unsur-unsur Mikro Kimia Tanah	275
13.2 Manfaat dari Unsur unsur Mikro Kimia Tanah.....	277
13.2.1 Seng (Zinc)	278
13.2.2 Besi (Fe)	279
13.2.3 Mangan (Mn)	280
13.2.4 Boron (B)	281
13.2.5 Klorin (Cl)	282
13.2.6 Tembaga (Cu).....	282
13.2.7 Molibdenum (Mo)	283
13.3 Dampak Defisiensi dari Unsur-unsur Mikro Kimia Tanah.....	284
13.3.1 Seng (Zinc)	284
13.3.2 Besi (Fe)	285
13.3.3 Mangan (Mn)	285
13.3.4 Boron (B)	286
13.3.5 Klorin (Cl)	286
13.3.6 Tembaga (Cu).....	287
13.3.7 Molibdenun (Mo).....	287
13.4 Pemilihan Aplikasi dari Unsur-unsur Mikro Kimia Tanah	288
DAFTAR PUSTAKA	291
BIODATA PENULIS	293

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Aplikasi Biochar Pada Media Tanam Di Polibag	14
Gambar 1. 2 Pertumbuhan Tanaman Jagung dan Kedelai yang Diaplikasikan Biokompos	17
Gambar 1. 3 Pengeringan Lumpur Laut (a), dan Pertumbuhan Tanaman Padi Akibat Aplikasi Lumpur Laut dan Perlakuan Lainnya (b).....	19
Gambar 2. 1 Klasifikasi Koloid Tanah.....	34
Gambar 2. 2 Susunan Atom Dalam Tetrahedron Silika (A) dan Dihubungkan Dalam Lembaran Tetrahedral (B).....	35
Gambar 2. 3 Susunan Atom Dalam Oktahedron (A) dan dalam Lembaran Oktahedral (B)	36
Gambar 2. 4 Susunan Lapisan Mineral Lempung Silikat dengan Perbandingan 1:1 Dan 2:1	37
Gambar 2. 5 Susunan Lembaran Tetrahedral dan Lembaran Oktahedral dalam Filosilikat Umum Dan Beberapa Sifat Umumnya	43
Gambar 2. 6 Muatan yang Bergantung pada Ph yang Bervariasi dalam Lempung Oksihidroksida dan Partikel Humus Tanah	47
Gambar 2. 7 Representasi Skematis Reaksi Pertukaran Kation dalam Tanah	50
Gambar 2. 8 Mekanisme Penyerapan Spesifik Fosfat Ke Permukaan Koloid.....	53
Gambar 4. 1 Ilustrasi Kapasitas Pertukaran Kation (CEC) Tanah. Diadaptasi Dari Spectrum Analytics Inc.....	77
Gambar 4. 2 Hubungan Antara Kejenuhan Basa dan H^+ Pada Kapasitas Tukar Kation di Berbagai Ph Tanah	78
Gambar 4. 3 Proses Pembentukan Kation Asam dan Kation Basa Yang Mempengaruhi Nilai pH	83
Gambar 4. 4 Model Budidaya Konvensional di Daerah Gurun yang Menunjukkan Hasil Analisis Ktk Dan Kb Nya.....	85
Gambar 4. 5 Penerapan Plot Monokultur Tanaman Sayuran Berdasarkan Agroforestri <i>Eucalyptus</i> Sp.	86
Gambar 5. 1 Beberapa Unsur Hara Esensial dan Peranannya dalam Tanaman	90
Gambar 5. 2 Pola Penyerapan Hara P Oleh 102 Jenis Tanah	94
Gambar 5. 3 Skema Interaksi Hara dengan Tanah dan Tanaman	107

Gambar 5. 4 Hubungan Antara Penyerapan Hara dari Larutan dengan Pertumbuhan Tanaman	108
Gambar 5. 5 Mobilitas Hara di dalam Phloem (A) Tidak Mobil (Ca, Fe) B. Mobil (P, K, Mg, N)	112
Gambar 6. 1 Proses Penyerapan Unsur Hara oleh Tumbuhan.....	120
Gambar 7. 1 Batuan Fosfat Apatit.....	144
Gambar 7. 2 Siklus Fosfor dalam Tanah.....	150
Gambar 7. 3 Pengaruh pH tanah Terhadap Jerapan dan Presipitasi P ...	153
Gambar 7. 4 Kelarutan Mineral Ca, Al dan Fe Fosfat dalam Tanah	158
Gambar 11. 1 Struktur Klorofil	244
Gambar 11. 2 Tanaman Jagung yang Kekurangan Nitrogen (Kiri) dan Cukup Nitrogen (Kanan)	244
Gambar 12. 1 Siklus Sulfur di Alam Click or tap here to enter text.	260
Gambar 12. 2 Belerang atau Sulfur di Alam (Rumuskimia.net, 2015)	261
Gambar 12. 3 Pencemaran Udara Berupa Sulfur Dioksida (ESA.int, 2020)	269

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Hubungan Antara Kisaran Ukuran Partikel dan Luas Permukaan Spesifik Partikel Tanah.....	33
Tabel 2. 2 Jari-Jari Kation Umum dalam Struktur Filosilikat.....	39
Tabel 2. 3 Kisaran Cec dalam Berbagai Koloid Tanah. (Brady dan Weil, 2010).....	48
Tabel 4. 1 Kejenuhan Basa yang Telah Dilaporkan Sebelumnya dan Rasio Kejenuhan Kation Basa (BCSR) untuk Tanah "Ideal.".....	79
Tabel 4. 2 Perbandingan Dua Jenis Tanah dengan Kejenuhan Basa dan CEC yang Sama dan Rasio "Ideal" 13:2:1 untuk Ca : Mg : K tetapi Perkiraan Kadar Kalsium, Magnesium, dan Kalium.	80
Tabel 5. 1 Persen Hara Diserap oleh Tanaman Jagung yang Menuju ke Akar Melalui Intersepsi Akar, Aliran Massa, dan Difusi	114
Tabel 6. 1 Perbandingan Tiga Mekanisme Sistem Hara.....	132
Tabel 7. 1 Sumber Fosfat.....	146
Tabel 7. 2 Wilayah Penghasil Pospat Alam	147
Tabel 7. 3 Mineral P yang Biasa Ditemukan pada Tanah Masam, Netral dan Tanah Berkapur.....	156
Tabel 11. 1 Kelebihan dan Kekurangan Pupuk Nitrogen	247
Tabel 13. 1. Konsentrasi Dan Kisaran Kecukupan Unsur Hara Terpilih Pada Tanaman (Berdasarkan Berat Kering)	288

BAB 1

TINGKAT KEASAMAN (pH) TANAH

Oleh Edy Syafril Hayat

1.1 Pendahuluan

Sifat kimia tanah memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman. Memahami sifat-sifat kimia tanah seperti pH, kapasitas tukar kation, kejenuhan basa, dan unsur hara esensial serta mekanisme penyediaan dan penyerapan unsur hara, dapat membantu para petani dan ahli tanah untuk mengelola tanah dengan lebih efektif dan efisien dalam rangka meningkatkan hasil pertanian dan keberlanjutan ekosistem tanah. Macam-Macam Sifat Kimia Tanah meliputi :

- a. Tingkat Keasaman (pH Tanah): pH tanah menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan tanah. Tanah dengan pH rendah (kurang dari 7) bersifat asam, sedangkan tanah dengan pH lebih tinggi (lebih dari 7) bersifat basa. pH tanah sangat berpengaruh pada ketersediaan unsur hara bagi tanaman. pH yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat mengurangi ketersediaan unsur-unsur hara tertentu dan mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam tanah. Idealnya, pH tanah yang baik untuk pertumbuhan tanaman berkisar antara 6 hingga 7.
- b. Koloid Tanah: Koloid tanah adalah partikel-partikel halus dalam tanah yang berukuran sangat kecil, biasanya memiliki diameter kurang dari 1 mikron. Koloid tanah, yang terutama terdiri dari mineral liat dan bahan organik, memiliki kemampuan untuk menyerap dan menyimpan air, unsur hara, serta kation (ion positif). Koloid ini juga

memiliki sifat yang penting dalam proses pertukaran ion dan interaksi kimia tanah. Koloid tanah berperan dalam memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas pertukaran kation.

- c. Kapasitas Tukar Kation (KTK): Kapasitas Tukar Kation (KTK) adalah ukuran kemampuan tanah untuk menjerap dan mempertukarkan ion-ion positif (kation) yang ada di dalamnya, seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), kalium (K^+), dan natrium (Na^+). Tanah dengan KTK tinggi dapat menahan lebih banyak unsur hara dan cenderung lebih subur. KTK dipengaruhi oleh jumlah koloid tanah dan bahan organik. Semakin tinggi KTK tanah, semakin banyak unsur hara yang dapat diserap dan disediakan untuk tanaman.
- d. Kejenuhan Basa: Kejenuhan basa mengacu pada perbandingan antara jumlah basa (kation yang tidak berbahaya seperti kalsium, magnesium, kalium) dengan jumlah total kapasitas tukar kation dalam tanah. Kejenuhan basa yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar kation pada tanah adalah basa yang tidak berbahaya bagi tanaman, sedangkan kejenuhan basa yang rendah menandakan dominasi kation asam seperti hidrogen (H^+) dan aluminium (Al^{3+}), yang bisa menyebabkan tanah menjadi asam dan berpotensi merugikan tanaman.
- e. Unsur-Unsur Hara Esensial Tanah: Unsur hara esensial adalah unsur-unsur kimia yang diperlukan oleh tanaman untuk tumbuh dan berkembang. Unsur-unsur ini terbagi menjadi dua kategori:
 - i. Unsur Hara Makro: Dibutuhkan dalam jumlah besar oleh tanaman, meliputi 9 unsur yaitu Karbon (C), Hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S).

- ii. Unsur Hara Mikro: Dibutuhkan dalam jumlah sangat kecil, tetapi tetap penting bagi nutrisi tanaman, terdiri dari 7 unsur hara mikro meliputi besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), zinc (Zn), molibdenum (Mo), boron (B), dan klor (Cl).
- f. Mekanisme Penyediaan dan Penyerapan Unsur Hara.

Penyediaan Unsur Hara: Unsur hara tersedia bagi tanaman melalui berbagai mekanisme, termasuk proses kimia dan biologi. Unsur-unsur hara dalam tanah dapat berada dalam bentuk larutan atau terikat pada koloid tanah. Proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme tanah juga menyumbang terhadap pelepasan unsur hara ke dalam tanah. Penyerapan Unsur Hara: Tanaman menyerap unsur hara melalui akar, umumnya dalam bentuk ion yang terlarut dalam air tanah. Penyerapan ini dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti pH tanah, ketersediaan unsur hara, dan interaksi antara akar tanaman dengan mikroorganisme tanah. Proses penyerapan dapat dilakukan melalui difusi, adsorpsi, dan pertukaran ion yang terjadi antara akar dan koloid tanah.

1.2 Pengertian pH Tanah

pH tanah adalah ukuran keasaman atau kebasaan tanah yang mempengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Skala pH berkisar dari 0 hingga 14, dengan pH 7 dianggap netral. pH yang kurang dari 7 dianggap asam, sedangkan pH lebih dari 7 dianggap basa. Memahami pH tanah membantu dalam memelihara kesehatan tanaman dan meningkatkan hasil pertanian. Reaksi tanah menunjukkan sifat keasaman atau alkalinitas tanah yang dinyatakan dengan nilai pH. Nilai pH menunjukkan banyaknya konsentrasi ion hidrogen (H^+) di dalam tanah. Makin tinggi kadar ion H^+ di dalam tanah, semakin masam tanah tersebut. Di dalam tanah selain H^+ dan

ion-ion lain ditemukan pula ion OH^- , yang jumlahnya berbanding terbalik dengan banyaknya ion H^+ . Pada tanah-tanah masam jumlah ion H^+ lebih tinggi dari pada OH^- , sedangkan pada tanah alkalis kandungan OH^- lebih banyak daripada H^+ . Bila kandungan H^+ saman dengan OH^- maka tanah akan bereaksi netral yaitu mempunyai $\text{pH} = 7$ (Hardjowigeno, 2010).

pH tanah adalah salah satu faktor kunci yang mempengaruhi kesehatan tanah dan tanaman. Berikut adalah beberapa alasan mengapa pH tanah sangat penting:

1. Ketersediaan Nutrisi

- **Penyerapan Nutrisi:** pH tanah mempengaruhi ketersediaan nutrisi penting bagi tanaman. Nutrisi seperti nitrogen, fosfor, kalium, kalsium, magnesium, dan sulfur memiliki rentang pH tertentu di mana mereka lebih mudah tersedia. Misalnya, fosfor lebih tersedia dalam tanah dengan pH antara 6 hingga 7. Pada pH yang terlalu rendah (asam) atau terlalu tinggi (basa), ketersediaan nutrisi ini bisa berkurang drastis.
- **Toksisitas Nutrisi:** pH tanah juga mempengaruhi toksisitas beberapa unsur. Tanah yang terlalu asam dapat meningkatkan ketersediaan logam berat seperti aluminium dan mangan, yang dapat menjadi racun bagi tanaman. Sebaliknya, tanah yang terlalu basa dapat mengurangi ketersediaan nutrisi seperti fosfor dan tembaga.

2. Kesehatan Tanaman

- **Pertumbuhan dan Produksi:** Tanaman yang tumbuh dalam kondisi pH tanah yang tidak sesuai mungkin mengalami pertumbuhan yang terhambat, gejala kekurangan nutrisi, atau bahkan kematian. Misalnya, pH yang sangat rendah atau sangat tinggi dapat menyebabkan daun menguning, pertumbuhan kerdil, dan hasil panen yang rendah.

- Ketahanan Terhadap Penyakit: pH tanah juga dapat mempengaruhi kerentanan tanaman terhadap penyakit dan hama. Beberapa patogen dan hama lebih aktif dalam kondisi pH tertentu, sehingga mempengaruhi kesehatan tanaman.
3. Aktivitas Mikroba Tanah
- Proses Biologis: Mikroba tanah, seperti bakteri dan jamur, memainkan peran penting dalam proses dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi. Aktivitas mikroba ini sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Mikroba tertentu berkembang dengan baik pada pH tertentu, dan perubahan pH dapat mengubah komposisi dan aktivitas mikroba tanah.
 - Kesuburan Tanah : Keseimbangan mikroba yang sehat mendukung proses pembentukan humus dan penguraian bahan organik, yang berkontribusi pada kesuburan tanah. Tanah dengan pH yang sesuai mendukung mikroba yang bermanfaat, sehingga meningkatkan kesuburan dan kesehatan tanah.
4. Struktur Tanah
- Kepadatan dan Drainase: pH tanah dapat mempengaruhi struktur fisik tanah. Tanah yang terlalu asam atau basa bisa mengalami perubahan dalam struktur, yang berdampak pada kepadatan tanah, aerasi, dan kemampuan drainase. Tanah yang terlalu asam, misalnya, dapat mengalami penggumpalan yang mengurangi drainase dan aerasi.
 - Erosi Tanah: pH tanah juga dapat mempengaruhi risiko erosi. Tanah yang tidak dalam kondisi optimal mungkin lebih mudah tererosi oleh air atau angin, yang dapat mengurangi kesuburan tanah dan merusak lingkungan.
5. Pengelolaan Tanah dan Praktik Pertanian
- Penyesuaian dan Pemberian Pupuk: Memahami pH tanah membantu petani dalam memilih jenis pupuk

yang tepat dan mengatur aplikasi yang efisien. Dengan informasi pH tanah, petani dapat menyesuaikan aplikasi kapur atau bahan pengasam untuk mencapai pH tanah yang optimal.

- Praktik Berkelanjutan: Menjaga pH tanah dalam rentang yang sesuai adalah bagian dari praktik pertanian berkelanjutan. Ini membantu dalam menjaga kesehatan tanah jangka panjang, mengurangi kebutuhan untuk input tambahan, dan mempromosikan pertumbuhan tanaman yang sehat.

6. Lingkungan dan Ekosistem

- Pengaruh pada Ekosistem: pH tanah tidak hanya mempengaruhi pertanian, tetapi juga ekosistem alami. Perubahan pH tanah dapat mempengaruhi vegetasi alami, keanekaragaman hayati, dan fungsi ekosistem secara keseluruhan.

Dengan demikian, pH tanah memainkan peran krusial dalam memastikan tanah tetap sehat, produktif, dan mendukung pertumbuhan tanaman yang optimal serta keseimbangan ekosistem. Memantau dan mengelola pH tanah secara efektif adalah langkah penting dalam pertanian dan pengelolaan tanah yang baik.

pH tanah bersifat dinamis, faktor-faktor yang mempengaruhinya adalah :

- Materi Organik : Penambahan bahan organik, seperti kompos, dapat mempengaruhi pH tanah, sering kali mengurangi keasaman tanah dengan waktu.
- Jenis Tanah : Berbagai jenis tanah memiliki kapasitas berbeda untuk menahan pH. Misalnya, tanah liat cenderung memiliki kapasitas buffer yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah pasir.
- Pupuk dan Bahan Kimia : Penggunaan pupuk dan bahan kimia tertentu dapat mengubah pH tanah. Misalnya, pupuk berbasis amonium dapat menurunkan pH tanah,

sedangkan kapur pertanian dapat meningkatkan pH tanah.

- Penggunaan Air : Air hujan yang sangat asam atau penggunaan air irigasi yang mengandung mineral tertentu juga dapat mempengaruhi pH tanah.

1.3 Bahan-bahan untuk Meningkatkan pH Tanah

Peningkatan pH tanah merupakan salah satu aspek penting dalam pengelolaan kesuburan tanah, terutama di lahan pertanian. Beberapa bahan yang dapat digunakan untuk meningkatkan pH tanah meliputi kapur, abu, biochar, limbah binatang bercangkang, kompos, dan pupuk kandang. Setiap bahan ini memiliki mekanisme dan efektivitas yang berbeda dalam meningkatkan pH tanah.

➤ Kapur

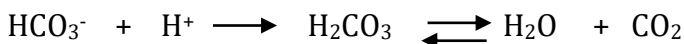
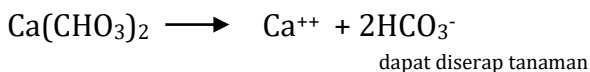
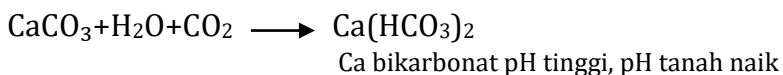
Kapur, sebagai salah satu bahan yang paling umum digunakan, berfungsi untuk menetralkan keasaman tanah. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan kapur dapat secara signifikan meningkatkan pH tanah, terutama pada tanah yang memiliki pH rendah (Purnamasari, 2024). Beberapa jenis kapur yang sering digunakan dalam pengapuran tanah adalah:

1. Kapur kalsit (CaCO_3): Merupakan bentuk kapur yang paling umum dan murah.
2. Kapur dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): Mengandung kalsium dan magnesium, berguna jika tanah kekurangan magnesium.
3. Kapur hidrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$): Digunakan untuk pengapuran yang lebih cepat karena mudah larut dalam air, tetapi lebih reaktif dan harus digunakan dengan hati-hati.

Reaksi pengapuran di dalam tanah adalah proses penambahan bahan yang mengandung kalsium, biasanya

berupa kapur (CaCO_3), ke dalam tanah. Pengapuran dilakukan untuk memperbaiki sifat tanah, terutama untuk mengurangi keasaman (pH tanah) yang terlalu rendah atau asam, sehingga meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Ketika kapur (CaCO_3) ditambahkan ke tanah, terjadi reaksi kimia antara kapur dengan asam (ion H^+) yang ada di dalam tanah. Reaksi tersebut menghasilkan perubahan pH tanah dari asam menuju netral atau sedikit basa. Reaksi pengapuran ini secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut:

Reaksi utama pengapuran (Hardjowogeno, 2010) :



1. Pada reaksi ini:
 - Kalsium karbonat (CaCO_3) bereaksi dengan ion hidrogen (H^+) yang ada di dalam tanah.
 - Ion kalsium (Ca^{2+}) yang terbentuk akan meningkatkan kadar kalsium di dalam tanah.
 - Gas karbon dioksida (CO_2) dilepaskan ke udara, dan air (H_2O) terbentuk.
2. Proses lanjutan: Setelah pengapuran, ion kalsium (Ca^{2+}) yang terlarut dalam tanah dapat berinteraksi dengan bahan organik atau komponen lain dalam tanah, membantu memperbaiki struktur tanah dan mengurangi kelarutan unsur-unsur berbahaya seperti aluminium (Al^{3+}), yang sering muncul di tanah asam.

Pengapuran dapat memberikan berbagai manfaat bagi tanah dan tanaman, antara lain:

- Meningkatkan pH tanah: Mengurangi keasaman tanah yang tinggi, membuat pH tanah lebih netral atau sedikit basa, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman.
- Mengurangi racun tanah: Di tanah asam, logam seperti aluminium dan mangan dapat menjadi racun bagi tanaman. Pengapuran membantu mengurangi ketersediaan logam-logam tersebut dengan menetralkan keasaman tanah.
- Meningkatkan aktivitas mikroba tanah: Peningkatan pH dapat mendukung pertumbuhan mikroorganisme tanah yang penting untuk dekomposisi bahan organik dan siklus hara.
- Meningkatkan ketersediaan unsur hara: Beberapa unsur hara, seperti fosfor (P), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg), lebih mudah diserap oleh tanaman di tanah yang memiliki pH netral.

➤ Abu

Abu, khususnya abu sekam padi, juga terbukti efektif dalam meningkatkan pH tanah. Penelitian menunjukkan bahwa abu sekam padi dapat memperbaiki pH tanah gambut yang rendah, sehingga meningkatkan kesuburan tanah untuk pertumbuhan tanaman (Wardania et al., 2023).

Abu sekam padi merupakan salah satu bahan organik yang memiliki potensi besar dalam meningkatkan pH tanah, terutama pada tanah yang bersifat asam. Penggunaan abu sekam padi sebagai amandemen tanah tidak hanya meningkatkan pH, tetapi juga memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, yang pada gilirannya dapat meningkatkan produktivitas pertanian. Salah satu mekanisme utama bagaimana abu sekam padi dapat meningkatkan pH tanah adalah melalui kandungan

mineral yang ada di dalamnya, terutama silika dan kalsium. Penelitian menunjukkan bahwa abu sekam padi dapat menetralkan keasaman tanah dengan cara menyediakan kalsium karbonat, yang berfungsi untuk menetralkan ion H^+ dalam tanah (Purnamasari, 2024; Wardania et al., 2023). Dengan demikian, penambahan abu sekam padi dapat mengubah pH tanah dari asam menjadi lebih netral, yang sangat bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Wardania et al. menunjukkan bahwa penggunaan abu sekam padi dalam kombinasi dengan pupuk magnesium dapat meningkatkan pH tanah gambut yang rendah (Wardania et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa abu sekam padi tidak hanya berfungsi secara langsung untuk meningkatkan pH, tetapi juga dapat berinteraksi dengan bahan lain untuk memberikan efek yang lebih besar. Dalam konteks ini, abu sekam padi dapat dianggap sebagai bahan amandemen yang multifungsi, yang tidak hanya meningkatkan pH tetapi juga ketersediaan unsur hara. Abu sekam padi juga memiliki sifat pozzolan, yang berarti dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam kondisi basah untuk membentuk senyawa yang dapat meningkatkan stabilitas tanah (Wedayani, 2024). Ini adalah keuntungan tambahan, karena tidak hanya meningkatkan pH, tetapi juga memperbaiki struktur tanah, sehingga meningkatkan kapasitas retensi air dan aerasi tanah. Penelitian lain menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, seperti bawang merah dan kubis bunga, yang menunjukkan bahwa peningkatan pH tanah berkontribusi pada hasil pertanian yang lebih baik (Purnamasari, 2024; Wardania et al., 2023). Secara keseluruhan, penggunaan abu sekam padi sebagai amandemen tanah merupakan strategi yang efektif untuk

meningkatkan pH tanah, terutama pada tanah yang bersifat asam. Dengan meningkatkan pH, abu sekam padi tidak hanya memperbaiki kondisi tanah tetapi juga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik dan meningkatkan produktivitas pertanian.

➤ Biochar

Biochar, yang dihasilkan dari proses pirolisis bahan organik, juga memiliki potensi yang besar dalam meningkatkan pH tanah. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan biochar dapat meningkatkan pH tanah dengan cara meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan menurunkan kadar garam dalam tanah (Wedayani, 2024). Selain itu, biochar juga berfungsi sebagai sumber nutrisi bagi tanaman, yang dapat memperbaiki kualitas tanah secara keseluruhan (Ganestri et al., 2021). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biochar dapat meningkatkan pH tanah suboptimal basah yang ditanami kedelai (Andayani, et al., 2024)

Peranan biochar dalam meningkatkan pH tanah sangat penting, terutama pada tanah yang bersifat asam. Secara umum, biochar dapat membantu menetralkan keasaman tanah dan memperbaiki kualitas tanah secara keseluruhan. Berikut adalah penjelasan lebih mendalam mengenai bagaimana biochar berperan dalam peningkatan pH tanah:

1. Sifat Basa dari Biochar

Biochar memiliki sifat basa (alkalis) karena proses pirolisis bahan organik (seperti sekam padi, kayu, atau limbah pertanian) pada suhu tinggi tanpa oksigen. Selama proses ini, biochar mengandung senyawa-senyawa mineral yang bersifat basa seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan kalium (K^+). Ketika diterapkan pada tanah, biochar akan melepaskan ion-ion basa ini, yang dapat berfungsi untuk menetralkan ion hidrogen (H^+) yang

berlebihan dalam tanah asam. Ini pada gilirannya meningkatkan pH tanah, menjadikannya lebih netral atau sedikit basa, yang lebih kondusif untuk pertumbuhan tanaman.

2. *Buffering Capacity* (Kemampuan Penyangga)

Biochar memiliki kapasitas penyangga yang tinggi, yang berarti dapat mengatur fluktuasi pH di tanah. Ketika tanah menjadi terlalu asam, biochar bertindak sebagai penyangga dengan menetralkan kelebihan ion H^+ , sehingga pH tanah bisa lebih stabil dan lebih tinggi. Sebaliknya, biochar juga dapat mencegah pH tanah menjadi terlalu tinggi pada tanah alkalis, memberikan keseimbangan yang lebih baik.

3. Peningkatan Ketersediaan Unsur Hara

Pada tanah yang sangat asam, beberapa unsur hara penting seperti fosfor (P) menjadi kurang tersedia karena terikat dengan senyawa yang tidak dapat digunakan oleh tanaman. Dengan meningkatnya pH tanah akibat penambahan biochar, fosfor menjadi lebih tersedia. Peningkatan pH juga mempengaruhi ketersediaan unsur mikro seperti tembaga (Cu), seng (Zn), dan molibdenum (Mo), yang semakin mudah diserap oleh tanaman pada pH yang lebih mendekati netral.

4. Mengurangi Keberadaan Logam Berat

Pada tanah yang asam, ion H^+ yang berlebihan dapat melarutkan logam-logam berat seperti aluminium (Al^{3+}) yang berbahaya bagi tanaman. Biochar dapat mengikat logam-logam berat tersebut, mengurangi ketersediaan ion yang berbahaya, dan membantu memperbaiki pH tanah. Dengan mengurangi potensi toksisitas logam berat, biochar dapat membantu menciptakan lingkungan tanah yang lebih sehat bagi pertumbuhan tanaman.

5. Peningkatan Kapasitas Tukar Kation (KTK)

Biochar KTK yang tinggi, KTK adalah kemampuan tanah untuk menahan dan menukar ion-ion positif (kation), yang berperan dalam mempertahankan ketersediaan unsur hara. Dengan meningkatkan KTK, biochar dapat meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan kalsium, magnesium, dan kalium yang memiliki peran dalam meningkatkan pH tanah, serta membantu mencegah kehilangan unsur hara yang diperlukan tanaman.

6. Sumber Kalsium dan Magnesium

Beberapa jenis biochar, terutama yang terbuat dari bahan seperti sekam padi atau kayu, mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) dan magnesium karbonat (MgCO_3), yang dikenal sebagai bahan yang dapat meningkatkan pH tanah. Ketika biochar terurai atau berinteraksi dengan air tanah, kalsium dan magnesium ini dapat dilepaskan, memberikan efek penurunan keasaman tanah dan meningkatkan pH secara bertahap.

7. Dampak Jangka Panjang

Biochar memiliki daya tahan yang sangat lama di dalam tanah. Berbeda dengan pupuk kimia atau bahan organik lainnya yang cepat terurai, biochar dapat bertahan hingga puluhan tahun, memberikan efek peningkatan pH yang berkelanjutan dan stabil dalam jangka panjang. Oleh karena itu, aplikasi biochar menjadi salah satu cara yang efisien dan berkelanjutan untuk mengelola tanah asam.



Gambar 1. 1 Aplikasi Biochar Pada Media Tanam di Polibag (Andayani, Et. Al., 2024)

➤ **Limbah binatang bercangkang**

Limbah binatang bercangkang, seperti cangkang telur, juga dapat digunakan untuk meningkatkan pH tanah. Limbah ini mengandung kalsium karbonat yang dapat berfungsi sebagai amandemen untuk menetralkan keasaman tanah (Syaiikhullah et al., 2021). Penggunaan limbah dari udang, kulit kerang, kepiting, dan binatang bercangkang lainnya (yang umumnya kaya akan kalsium karbonat, CaCO_3) merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan pH tanah yang terlalu asam. Bahan-bahan ini, ketika diolah dengan tepat, dapat berfungsi sebagai amandemen yang membantu menetralkan keasaman tanah. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang penggunaan limbah binatang bercangkang ini untuk tujuan tersebut. Kandungan Utama dalam Limbah Bercangkang :

- a. Kalsium Karbonat (CaCO_3): Cangkang udang, kepiting, kerang, dan binatang bercangkang lainnya mengandung sejumlah besar kalsium karbonat, yang

berfungsi sebagai bahan pengubah pH tanah. Kalsium karbonat bersifat basa, dan ketika dibiarkan terurai dalam tanah, senyawa ini akan bereaksi dengan asam (H^+) di dalam tanah, meningkatkan pH dan mengurangi keasaman.

- b. Kalsium (Ca): Selain berfungsi untuk menetralkan pH, kalsium juga berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Kalsium membantu pembentukan dinding sel tanaman, memperkuat struktur tanaman, serta meningkatkan penyerapan nutrisi lainnya.
- c. Magnesium (Mg): Beberapa cangkang binatang bercangkang juga mengandung magnesium, yang bermanfaat untuk tanaman. Magnesium adalah unsur penting dalam fotosintesis dan membantu tanaman untuk tumbuh dengan sehat.

Cara menggunakan limbah cangkang untuk meningkatkan pH Tanah. Untuk mengoptimalkan penggunaan limbah binatang bercangkang ini, berikut adalah langkah-langkah yang bisa diikuti:

- a. Menghancurkan Limbah

Cangkang yang utuh, baik itu cangkang udang, kepiting, kerang, atau binatang bercangkang lainnya, perlu dihancurkan terlebih dahulu menjadi potongan-potongan kecil. Ini karena semakin kecil ukuran partikel cangkang, semakin cepat proses dekomposisinya dan semakin cepat pula mereka bisa bereaksi dengan tanah untuk menaikkan pH. Anda bisa menggunakan palu, gergaji, atau mesin penghancur untuk menghancurkan cangkang.

- b. Menyebarkan di Tanah

Setelah dihancurkan, Anda dapat menaburkan potongan cangkang ke permukaan tanah yang asam, lalu mencampurnya dengan tanah menggunakan cangkul atau alat serupa. Sebaiknya distribusikan

cangkang secara merata di seluruh area tanah yang ingin dinaikkan pH-nya.

c. Campurkan dengan Kompos atau Pupuk Organik

Untuk mempercepat proses dekomposisi, cangkang binatang bercangkang bisa dicampurkan dengan bahan organik lainnya, seperti kompos atau pupuk organik. Bahan organik membantu mikroorganisme tanah bekerja lebih cepat dalam memecah cangkang, sehingga kalsium karbonat lebih cepat terdistribusi dan pH tanah bisa meningkat lebih efektif.

d. Penggunaan Teratur

Limbah cangkang akan terurai secara perlahan, sehingga perubahan pH tanah mungkin tidak terlihat instan. Penggunaan secara berkala dalam jangka panjang akan memberikan hasil yang lebih baik. Sebagai contoh, cangkang yang dihancurkan bisa ditambahkan setiap musim tanam atau sekali setiap tahun tergantung pada kondisi tanah.

➤ Kompos

Kompos adalah hasil dekomposisi bahan organik yang kaya akan nutrisi. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan kompos dapat meningkatkan pH tanah, terutama pada tanah yang bersifat asam. Proses dekomposisi dalam pembuatan kompos menghasilkan ion OH^- yang dapat menetralkan ion H^+ , sehingga meningkatkan pH tanah (Annisa, 2022; Sit et al., 2020). Selain itu, kompos juga menyediakan unsur hara yang diperlukan tanaman, yang berkontribusi pada pertumbuhan tanaman yang lebih baik (Nasution, 2024).

Sementara itu, kompos yang dihasilkan dari dekomposisi bahan organik dapat meningkatkan pH tanah melalui proses mineralisasi yang menghasilkan ion OH^- , yang berfungsi untuk menetralkan ion H^+ dalam tanah (Muliarta, 2020). Pupuk kandang, yang kaya akan

unsur hara, juga berkontribusi dalam meningkatkan pH tanah. Pupuk ini tidak hanya memperbaiki sifat kimia tanah tetapi juga meningkatkan sifat fisik dan biologi tanah (Hidayat et al., 2023). Secara keseluruhan, penggunaan bahan-bahan tersebut dalam pengelolaan tanah dapat meningkatkan pH tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Kombinasi dari berbagai bahan amandemen dapat memberikan hasil yang lebih optimal dalam meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas pertanian.



Gambar 1. 2 Pertumbuhan Tanaman Jagung dan Kedelai yang Diaplikasikan Biokompos (Hayat, Et AL., 2024)

Limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari industri kelapa sawit dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan amandemen tanah. TKKS mengandung selulosa yang dapat terurai menjadi senyawa yang lebih sederhana, yang berpotensi meningkatkan pH tanah. Penelitian menunjukkan bahwa aplikasi TKKS dapat meningkatkan pH tanah, terutama ketika digunakan dalam bentuk kompos atau biochar (Andayani, et al., 2019 ; Annisa, 2022; Setiawan et al., 2022). TKKS juga dapat

meningkatkan ketersediaan unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, yang penting untuk pertumbuhan tanaman (Setiawan et al., 2022). Selain itu, TKKS dapat digunakan sebagai mulsa untuk mengurangi evaporasi air dan menjaga kelembaban tanah, yang juga berkontribusi pada peningkatan kualitas tanah (Nasution, 2024). Secara keseluruhan, kombinasi penggunaan kompos, pupuk kandang, dan limbah TKKS dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam meningkatkan pH tanah dan kesuburan tanah secara keseluruhan. Pengelolaan yang tepat terhadap bahan-bahan ini dapat membantu dalam menciptakan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan produktif.

➤ Pupuk Kandang

Pupuk kandang juga berfungsi sebagai amandemen tanah yang efektif. Pupuk ini mengandung berbagai unsur hara makro dan mikro yang penting untuk pertumbuhan tanaman. Penambahan pupuk kandang dapat meningkatkan pH tanah dengan cara menetralkan keasaman tanah. Pupuk kandang yang terdekomposisi dengan baik tidak hanya meningkatkan pH tanah tetapi juga memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas retensi air, dan mendukung aktivitas mikroba yang bermanfaat (Nasution, 2024; Sopa et al., 2022). Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pupuk kandang dapat meningkatkan kesuburan tanah secara keseluruhan, yang berdampak positif pada hasil pertanian (Sopa et al., 2022).

➤ Lumpur Laut

Lumpur laut merupakan salah satu bahan yang dapat digunakan untuk meningkatkan pH tanah, terutama pada tanah yang bersifat asam. Penggunaan lumpur laut sebagai amandemen tanah memiliki beberapa mekanisme yang berkontribusi terhadap peningkatan pH dan perbaikan sifat kimia tanah. Salah satu penelitian

yang relevan menunjukkan bahwa penambahan lumpur laut dapat meningkatkan pH tanah gambut secara signifikan.



(a)



(b)

Gambar 1. 3 Pengeringan Lumpur Laut (a), dan Pertumbuhan Tanaman Padi Akibat Aplikasi Lumpur Laut dan Perlakuan Lainnya (b)

Dalam penelitian tersebut, pemberian lumpur laut dengan dosis 12% berhasil meningkatkan pH tanah dari 3,83 menjadi 4,63, serta pH KCl dari 2,50 menjadi 3,85 (Purnamasari, 2024). Peningkatan pH ini menunjukkan bahwa lumpur laut dapat berfungsi sebagai bahan amandemen yang efektif untuk menetralkan keasaman tanah, yang sangat penting untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Lumpur laut mengandung berbagai mineral dan unsur hara yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan pH tanah. Kandungan kalsium, magnesium, dan unsur mikro lainnya dalam lumpur laut dapat membantu menetralkan ion H^+ dalam tanah, sehingga meningkatkan pH. Selain itu, lumpur laut juga dapat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah, yang berfungsi untuk meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman (Purnamasari, 2024). Penelitian lain menunjukkan bahwa lumpur laut dapat digunakan sebagai amelioran di lahan pasca penambangan, di mana tanah sering kali mengalami penurunan kualitas dan keasaman yang tinggi. Dalam konteks ini, lumpur laut dapat berfungsi untuk

memperbaiki sifat kimia tanah dan meningkatkan pH, meskipun hasilnya mungkin bervariasi tergantung pada dosis dan kombinasi dengan bahan lain (Wardania et al., 2023). Secara keseluruhan, penggunaan lumpur laut sebagai amandemen tanah menawarkan potensi yang signifikan dalam meningkatkan pH tanah, terutama pada tanah yang bersifat asam. Dengan meningkatkan pH, lumpur laut tidak hanya memperbaiki kondisi tanah tetapi juga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik dan meningkatkan produktivitas pertanian.

1.4 Penyebab Kemasaman Tanah

Kemasaman tanah (pH rendah) dapat disebabkan oleh berbagai faktor, baik yang bersifat alami maupun yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Ion H^+ dan ion Al^{3+} adalah dua komponen utama yang mempengaruhi pH tanah, namun ada banyak faktor lain yang turut berperan dalam proses ini. Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai faktor-faktor penyebab kemasaman tanah, termasuk ion H^+ dan Al^{3+} , serta faktor lainnya:

1. Ion H^+ (Ion Hidrogen)

- Ion H^+ adalah penyebab utama pengasaman tanah. Semakin banyak ion hidrogen (H^+) yang terdapat dalam tanah, semakin rendah pH tanah, yang menunjukkan bahwa tanah tersebut bersifat asam.
- Sumber Ion H^+ :
 - Pelapukan mineral: Proses pelapukan mineral batuan, terutama yang mengandung bahan-bahan asam, seperti granit dan basalt, dapat melepaskan ion H^+ ke dalam tanah. Ini mengurangi pH tanah secara alami.
 - Pembusukan bahan organik: Selama proses dekomposisi bahan organik (seperti daun, akar, dan sisa tanaman), mikroorganisme tanah

menghasilkan asam-organik (seperti asam asetat, asam formiat, asam humat), yang melepaskan ion H^+ ke dalam tanah.

- Proses nitrifikasi: Dalam tanah yang diberi pupuk nitrogen, bakteri mengubah amonium (NH_4^+) menjadi nitrat (NO_3^-) melalui proses nitrifikasi. Selama proses ini, ion H^+ dilepaskan ke dalam tanah, menyebabkan penurunan pH.

2. Ion Al^{3+} (Ion Aluminium)

- Pada pH rendah ($pH < 5$), ion Al^{3+} (aluminium) yang sebelumnya terikat pada mineral tanah akan terlepas dan terlarut dalam bentuk bebas. Ion Al^{3+} ini sangat berbahaya bagi tanaman karena bersifat toksik.
- Pelepasan Ion Al^{3+} terjadi karena peningkatan konsentrasi ion H^+ dalam tanah, yang menyebabkan peningkatan keasaman tanah. Ketika pH menurun, ion Al^{3+} menjadi lebih mudah terlarut dari mineral tanah, seperti kaolinit dan oksida aluminium.
- Dampak ion Al^{3+} :
 - Ion Al^{3+} menghambat penyerapan unsur hara oleh akar tanaman, terutama kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan fosfor (P), yang mengganggu pertumbuhan tanaman.
 - Ion Al^{3+} juga dapat merusak akar tanaman, mengganggu proses pertumbuhan akar dan penyerapan air, sehingga menghambat perkembangan tanaman.
 - Ion Al^{3+} juga dapat mengganggu mikroorganisme yang bermanfaat di dalam tanah, seperti bakteri fiksasi nitrogen dan mikroba pengurai bahan organik.

3. Curah Hujan Tinggi

- Curah hujan tinggi dapat menyebabkan tanah menjadi lebih asam melalui beberapa mekanisme:

- Pencucian (*leaching*): Hujan yang deras dapat mencuci atau menghilangkan kation-kation basa seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan kalium (K^+) dari tanah, yang berfungsi untuk menetralkan keasaman tanah. Ketika unsur-unsur ini terlarut dan terangkut oleh air hujan, ion H^+ menjadi lebih dominan dalam tanah, sehingga pH tanah menurun.
- Hujan Asam: Hujan asam yang terjadi akibat polusi udara dari gas sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) dapat mengasamkan tanah. Gas-gas ini bereaksi dengan uap air di atmosfer, membentuk asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3), yang kemudian jatuh ke tanah sebagai hujan asam, menurunkan pH tanah.

4. Pembusukan Bahan Organik

- Pembusukan bahan organik (seperti daun, akar, dan bahan tanaman lainnya) oleh mikroorganisme tanah menghasilkan asam organik. Proses dekomposisi ini menyebabkan pelepasan ion H^+ ke dalam tanah, yang menurunkan pH tanah.
- Pembusukan terjadi dengan lebih cepat di lingkungan yang lembap dan basah, seperti di daerah tropis, yang mempercepat proses pengasaman tanah.

5. Penggunaan Pupuk Kimia (Nitrogen)

- Penggunaan pupuk yang mengandung nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4^+), urea, atau asam fosfat dapat meningkatkan konsentrasi ion H^+ dalam tanah.
- Pupuk nitrogen seperti pupuk amonium sulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dapat mengasamkan tanah karena ion H^+ dilepaskan selama proses nitrifikasi. Pupuk ini mengubah amonium menjadi nitrat, dan dalam

proses tersebut, ion H^+ dilepaskan, menurunkan pH tanah.

- Penggunaan pupuk fosfat (seperti superfosfat) juga dapat menyebabkan peningkatan ion H^+ dalam tanah yang berkontribusi terhadap pengasaman.

6. Tanaman dan Penyerapan Nutrisi

- Tanaman juga dapat berperan dalam mengasamkan tanah. Beberapa tanaman mengeluarkan ion H^+ dari akar mereka untuk mempertahankan keseimbangan muatan ketika mereka menyerap kation-kation seperti kalsium (Ca^{2+}) atau magnesium (Mg^{2+}).
- Tanaman juga dapat menghasilkan senyawa-senyawa organik yang bersifat asam, seperti asam amino, yang dapat mengasamkan tanah.

7. Kondisi Tanah yang Asalnya Memang Asam

- Beberapa jenis tanah memiliki pH rendah secara alami. Tanah seperti podsolik dan latosol di daerah tropis sering kali sudah memiliki pH rendah karena komposisi mineralnya dan proses pembentukan tanah yang alami.
- Tanah ini memiliki kandungan alumunium yang tinggi dan sedikit kalsium karbonat ($CaCO_3$), sehingga cenderung asam meskipun tanpa faktor eksternal lainnya.

8. Genangan Air dan Drainase yang Buruk

- Tanah yang tergenang air atau memiliki drainase buruk cenderung menjadi lebih asam. Genangan air memperlambat proses aerasi tanah dan mengarah pada pembusukan bahan organik dalam kondisi anaerobik (tanpa oksigen), yang menghasilkan senyawa asam organik.
- Selain itu, genangan air dapat menyebabkan ion H^+ terakumulasi di tanah, mengakibatkan penurunan pH.

9. Erosi Tanah

- Erosi tanah yang menghilangkan lapisan atas tanah yang kaya bahan organik dapat meningkatkan kemasaman tanah. Lapisan atas ini sering mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) yang bersifat basa dan membantu menetralkan pH tanah. Kehilangan lapisan ini menyebabkan tanah menjadi lebih asam.

10. Perubahan Penggunaan Lahan

- Alih fungsi lahan, seperti penebangan hutan atau konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian, dapat meningkatkan kemasaman tanah. Pembakaran hutan dan pelepasan gas-gas asam ke atmosfer dapat berkontribusi pada terbentuknya hujan asam, yang menurunkan pH tanah.

1.5 Menghitung Kebutuhan Kapur

Upaya peningkatkan pH tanah secara praktis dapat dilakukan dengan penggunaan kapur pertanian, terutama kalsit dan dolomit. Penentuan banyaknya kebutuhan kapur untuk budidaya tanaman pertanian dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain :

1. Metode SMP (Schoemaker, McLean, dan Pratt)
2. Berdasarkan atas kadar Al-dapat ditukar (Al-dd) tanah permukaan.

Penjelasan untuk metode-metode tersebut :

1. Metode SMP (Schoemaker, McLean, dan Pratt) adalah salah satu teknik yang digunakan untuk mengukur kemampuan tanah dalam menahan atau menetralkan ion H^+ (hidrogen) dan Al^{3+} (aluminium) yang dapat berperan dalam pengasaman tanah. Metode ini secara khusus digunakan untuk menilai kapasitas buffer tanah terhadap asam dan untuk mengukur jumlah ion H^+ dan Al^{3+} yang ada di dalam tanah.

Metode SMP dikembangkan oleh Schoemaker, McLean, dan Pratt pada tahun 1950-an dan sering digunakan dalam analisis tanah yang mengalami pengasaman, baik secara alami maupun akibat intervensi manusia (seperti penggunaan pupuk atau polusi). Metode ini menggunakan SMP buffer solution (larutan penyangga SMP) untuk mengukur jumlah ion hidrogen (H^+) dan ion aluminium (Al^{3+}) dalam tanah. Buffer di sini berarti larutan yang memiliki kemampuan untuk mempertahankan pH tetap meskipun ada penambahan asam atau basa.

Prinsip Dasar Metode SMP:

- a. Metode ini didasarkan pada prinsip pertukaran ion, yaitu ketika tanah yang mengandung ion H^+ atau Al^{3+} dicampur dengan larutan buffer, ion H^+ atau Al^{3+} dalam tanah akan dipertukarkan dengan ion dalam larutan buffer. Ion H^+ biasanya berasal dari senyawa asam atau bahan organik yang membusuk, sedangkan ion Al^{3+} biasanya terlarut pada tanah yang bersifat asam (pH rendah).
 - Ion H^+ dalam tanah dapat berinteraksi dengan ion H^+ dalam buffer sehingga mengubah pH tanah.
 - Ion Al^{3+} dapat terlarut ke dalam larutan buffer jika pH tanah cukup rendah (asam), dan ini diukur untuk mengetahui seberapa banyak aluminium yang dapat berkontribusi terhadap keasaman tanah.
- b. Metode Al-dd (Aluminium yang dapat dipertukarkan) Menurut Sanchez (1976) adalah salah satu teknik yang digunakan untuk menentukan kebutuhan kapur (pengapuran) pada tanah yang asam. Metode ini berfokus pada pengukuran jumlah ion aluminium yang dapat dipertukarkan (Al^{3+}) dalam tanah, yang dapat memberikan informasi mengenai tingkat keasaman tanah dan potensi keracunan aluminium pada tanaman. Metode ini sangat relevan untuk tanah-tanah yang memiliki pH rendah, di mana ion aluminium (Al^{3+}) sering kali terlepas dan dapat menjadi racun bagi tanaman. Prosedur Al-dd

umumnya dilakukan dengan cara mengekstraksi tanah menggunakan larutan kalium klorida (KCl) 1 N, karena larutan KCl 1 N efektif untuk menggantikan kation Al yang terikat di permukaan partikel tanah tanpa melarutkan aluminium yang terikat secara kuat. Kebutuhan kapur (ton/ha) kemudian ditentukan dengan mengalikan kadar Al_{dd} dengan faktor 1, 1,5, 2 dan sebagainya. Perhitungan ini didasarkan pada banyaknya Ca^{2+} (miliekavalen) dalam kapur yang digunakan untuk menetralkan Al_{dd} yang terdapat dalam tanah.

Menurut Sanchez, dengan menggunakan kapur $1,5 \times Al_{dd}$ (ton/ha) dapat dinetralkan 85-90% Al_{dd} di dalam tanah yang mengandung 2-7 % bahan organik, untuk tanah yang mengandung bahan organik lebih tinggi akan diperlukan kapur lebih banyak misalnya $2 \times Al_{dd}$, dan seterusnya. (Hardjowogeno, 2010).

Contoh perhitungan kapur dengan metode Al_{dd} :

Suatu tanah memiliki nilai C-organik 2%, dan nilai $Al_{dd} = 2$ cmol(+)/kg, tentukan kebutuhan kapur kalsit/ha.

Jawab :

- Tentukan dulu kadar bahan organik tanah dengan rumus

$$\begin{aligned} \text{Bahan Organik (BO)} &= 1,724 \times C \text{ organik} \\ &= 1,724 \times 2 \\ &= 3,488 \% \end{aligned}$$

Maka berdasarkan pendapat Sanchez kita menggunakan rumus : Kebutuhan Kapur (KK) = $1,5 \times Al_{dd}$ (karena bahan organik tanah 2-7 %)

- Maka lanjutkan menghitung kebutuhan kapur

$$\begin{aligned} KK &= 1,5 \times Al_{dd} \\ &= 1,5 \times 2 \\ &= 3 \text{ ton kapur } CaCO_3 \end{aligned}$$

DAFTAR PUSTAKA

- Andayani, S., E.S. Hayat, R Hayati, HM Kurniawan, E Noerhartati, & ATP Irianti. (2019). Compost of oil palm empty fruit bunches with coastal mud and rice husk biochar to improve the acid sulphate soil fertility. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402
- Andayani, S., E.S. Hayat, A. Mursalin, Johansyah. (2024). Inovasi Teknologi Biochar dan Bokashi pada Tanaman Kedelai di Tanah Suboptimal Basah Secara Berkelanjutan. Get Press Indonesia, Padang.
- Annisa, W., Hersanti, E., Pramono, A., Saleh, M., Sutarta, E. S., Setiawati, E., Sosiawan, H., Sutriadi, M. T., & Husnain. (2022). Biochar-Kompos Berbasis Limbah Kelapa Sawit: Bahan Amandemen Untuk Memperbaiki Kesuburan Dan Produktivitas Tanah Di Lahan Rawa. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 15(2), 103–116. <https://doi.org/10.21082/Jsd.V15n2.2021.103-116>
- Ganestri, R., Winarso, S., & Asyiah, I. (2021). Efektivitas pupuk organik dan pupuk hayati cair terhadap pemulihan tanah terdegradasi di desa sucopangepok. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 45(2), 175. <https://doi.org/10.21082/jti.v45n2.2021.175-185>
- Hardjowigeno, S (2010). Ilmu Tanah. Akademika Pressindo, Jakarta.
- Hata, F. (2024). Using bokashi and cow urine as organic low-cost amendments can enhance arugula (*eruca sativa* l.) agronomic traits but not always total polyphenols and antioxidant activity. *Horticulturae*, 10(2), 155. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020155>
- Hayat, E.S., S. Andayani, R. Suryani. (2024). Biokompos Kunci Pengelolaan Lahan Suboptimal. Get Press Indonesia, Padang

- Hidayat, A., Suciati, L., & Sudarko, S. (2023). Strategi pengembangan pupuk organik berbasis limbah ternak dan limbah pertanian di kabupaten jember. *Jurnal Agribest*, 7(1), 40-53. <https://doi.org/10.32528/agribest.v7i1.9309>
- Muliarta, I. (2020). Pemanfaatan kompos jerami padi guna memperbaiki kesuburan tanah dan hasil padi. *Rona Teknik Pertanian*, 13(2), 59-70. <https://doi.org/10.17969/rtp.v13i2.17302>
- Nasution, H. (2024). Aplikasi pemberian kompos tandan kelapa sawit untuk perbaikan beberapa sifat kimia tanah beskas tambang batu bara pada tanaman jambon dan tanaman sengon. *Multidiciplinary Scientifict Journal*, 2(4), 212-221. <https://doi.org/10.57185/mutiara.v2i4.178>
- Purnamasari, L. (2024). Pengaruh steel slag, fly ash dan bottom ash terhadap pertumbuhan tanaman padi di tanah gambut. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 26(1), 48-53. <https://doi.org/10.29244/jitl.26.1.48-53>
- Setiawan, B., Rosmalinda, R., & Jannah, W. (2022). Pengaruh pemberian biochar tandan kosong kelapa sawit terhadap pertumbuhan stek lada pada lapisan tanah subsoil ultisol. *Journal of Agro Plantation (Jap)*, 1(2), 62-73. <https://doi.org/10.58466/jap.v1i2.762>
- Sit, M., Nurhayati, N., & Widyanto, H. (2020). Peningkatan produktivitas kelapa sawit di lahan gambut melalui pemanfaatan kompos tandan buah kosong dan berbagai dekomposer. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 43(1), 13. <https://doi.org/10.21082/jti.v43n1.2019.13-20>
- Sopa, S., Fajarfika, R., Nurdiana, D., & Rismayanti, A. (2022). Pemberian berbagai dosis kompos tandan kosong dan abu boiler limbah kelapa sawit terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kacang tanah (*arachis hypogaea l.*). *Jagros Jurnal Agroteknologi Dan Sains (Journal of*

- Agrotechnology Science), 6(1), 12.
<https://doi.org/10.52434/jagros.v6i1.1616>
- Syaikhullah, G., Adhyatma, M., & Kusuma, S. (2021). Budidaya ternak cacing tanah (*lumbricus rubellus*) sebagai implementasi system zero waste di lingkungan peternak ruminansia desa bagorejo jember. *J-Dinamika Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 6(1), 87-92.
<https://doi.org/10.25047/jdinamika.v6i1.2564>
- Wardania, W., Asnawati, A., & Listiawati, A. (2023). Pengaruh abu sekam padi dan pupuk magnesium terhadap pertumbuhan dan hasil kubis bunga pada tanah gambut. *Jurnal Sains Pertanian Equator*, 12(3), 382.
<https://doi.org/10.26418/jspe.v12i3.63073>
- Wedayani, N. (2024). Pengaruh pemberian biochar limbah pisang terhadap kesuburan tanah. *Agro Bali Agricultural Journal*, 7(1), 137-145.
<https://doi.org/10.37637/ab.v7i1.1533>
- Winarsih, E., Hikamah, S., & Sudiarti, D. (2022). E effectiveness of bokashi chicken stool on hybrid corn productivity (*zea mays* l). *Bioedukasi*, 20(2), 12.
<https://doi.org/10.19184/bioedu.v20i2.29266>

BAB 2

KOLOID TANAH

Oleh Ismail Astar

2.1 Pendahuluan

Tanah merupakan sistem yang kompleks yang terdiri dari berbagai komponen, salah satunya adalah koloid tanah yang memainkan peran krusial dalam menentukan sifat fisika dan kimia tanah. Koloid tanah, dengan ukurannya yang sangat kecil dan luas permukaan spesifik yang besar, menjadi komponen kunci dalam mengendalikan berbagai proses penting dalam tanah (Essington, 2015). Keberadaan koloid tanah sangat mempengaruhi kesuburan tanah melalui kemampuannya dalam menyimpan dan melepaskan nutrisi tanaman, membentuk struktur tanah, serta mengatur ketersediaan air (Tan, 2014).

Dalam sistem tanah, koloid berperan sebagai tempat terjadinya reaksi pertukaran ion yang penting bagi ketersediaan nutrisi tanaman. Menurut Sposito (2016), koloid tanah memiliki muatan permukaan yang memungkinkan terjadinya interaksi elektrostatis dengan ion-ion dalam larutan tanah. Kemampuan ini menjadikan koloid tanah sebagai reservoir nutrisi yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman sesuai kebutuhan.

Pemahaman tentang koloid tanah menjadi semakin penting mengingat perannya dalam manajemen kesuburan tanah dan produktivitas pertanian. Brady dan Weil (2017) menyatakan bahwa pengetahuan tentang sifat dan perilaku koloid tanah sangat diperlukan dalam merancang strategi

pengelolaan tanah yang efektif. Hal ini mencakup aspek pemupukan, pengapuran, dan penambahan bahan organik yang kesemuanya berinteraksi dengan sistem koloid tanah.

Permasalahan degradasi tanah yang semakin meningkat, seperti penurunan kandungan bahan organik dan kerusakan struktur tanah, juga berkaitan erat dengan kondisi koloid tanah. Penelitian yang dilakukan oleh Hartmann et al. (2020) menunjukkan bahwa gangguan pada sistem koloid tanah dapat menyebabkan penurunan kualitas tanah secara signifikan. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang koloid tanah menjadi kunci dalam upaya konservasi dan rehabilitasi tanah.

2.2 Pengertian Koloid Tanah

Koloid tanah dapat didefinisikan sebagai partikel tanah yang berukuran sangat kecil dengan diameter kurang dari 1 μm (mikrometer) atau 0,001 mm. Koloid tanah merupakan bagian yang paling aktif dan menentukan sebagian besar sifat fisikokimia tanah.

Menurut Brady & Weil (2008), koloid tanah sangat penting karena ion-ion bermuatan pada permukaannya dapat menarik nutrisi tanah ketika terlarut dalam air sebagai ion bermuatan positif. Partikel koloid tidak pernah mengendap di dasar pelarut tetapi tetap mengambang dalam suspensi.

Koloid tanah tidak ditemukan dalam bentuk ion atau molekuler tetapi dalam bentuk akumulasi atom atau molekul. Suatu koloid didefinisikan sebagai materi "seperti lem" organik atau anorganik dengan ukuran partikel yang sangat kecil tetapi memiliki luas permukaan yang besar per satuan massa atau volume.

Fraksi koloid tanah didefinisikan sebagai fraksi tanah yang secara kolektif terdiri dari partikel-partikel anorganik dan organik berukuran kecil ($<0,002$ mm) (Brady dan Weil, 2010). Luas permukaan spesifik yang tinggi dan keberadaan

muatan listrik pada sebagian besar partikel bertanggung jawab atas karakteristik tanah yang penting seperti kapasitas pengembangan, kemampuan tanah untuk menahan air, penyerapan kation dan anion, serta pertukaran ion.

Pentingnya koloid dalam tanah berkaitan dengan hubungan antara ukurannya dengan jumlah luas permukaan yang tersedia untuk bereaksi dengan larutan tanah. Tabel 1 menunjukkan hubungan antara ukuran partikel dan besarnya luas permukaan yang terkait dengan rentang ukuran partikel untuk tanah lempung liat. Luas permukaan spesifik didefinisikan sebagai luas permukaan per satuan massa partikel padat dan dinyatakan dalam m^2g^{-1} tanah. Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.1, meskipun tanah ini mengandung pasir, lanau, dan lempung dalam proporsi yang sama menurut massa, sebagian besar luas permukaan dikaitkan dengan fraksi ukuran terkecil.

Tabel 2. 1 Hubungan Antara Kisaran Ukuran Partikel dan Luas Permukaan Spesifik Partikel Tanah

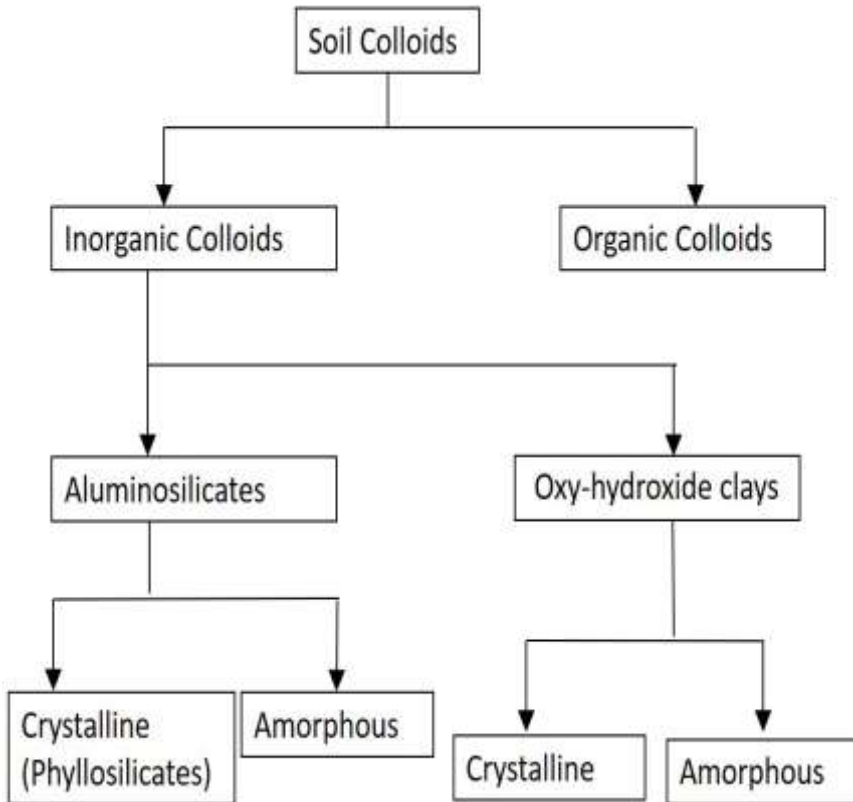
Fraksi Ukuran Partikel	Perkiraan Ukuran (μm)	Diameter (μm)	Persentase tanah lempung liat ^a (%)	Luas permukaan spesifik ^b (cm^2g^{-1})	Persentase luas permukaan (%)
Pasir	2000-50	1000	33.3	22.6	0.2
Lanau	50-2	25	33.3	90.9	0.8
Tanah Liat	<2	1	33.3	11,32	99

^a Diasumsikan tanah lempung liat dengan proporsi pasir, lanau, dan liat yang sama. ^b Dihitung berdasarkan partikel bulat seragam dengan diameter partikel median.

Sumber: Brady dan Weil, 2010)

Fase mineral dalam fraksi koloid atau berukuran lempung terutama berupa mineral filosilikat dan oksihidroksida (Gambar 2.1). Koloid organik juga berada dalam kisaran berukuran lempung dan tersusun dari partikel humus kecil yang relatif stabil dan tahan terhadap pembusukan biologis lebih lanjut. Partikel koloid yang beragam ini dapat muncul secara independen di lingkungan

tanah atau dapat muncul bersama-sama dalam kompleks organo-mineral (Newman dan Hayes, 1990).



Gambar 2. 1 Klasifikasi Koloid Tanah (Darshani Kumaragamage, Univ. Winnipeg Dilisensikan Berdasarkan Lisensi Cc By(Atribusi).

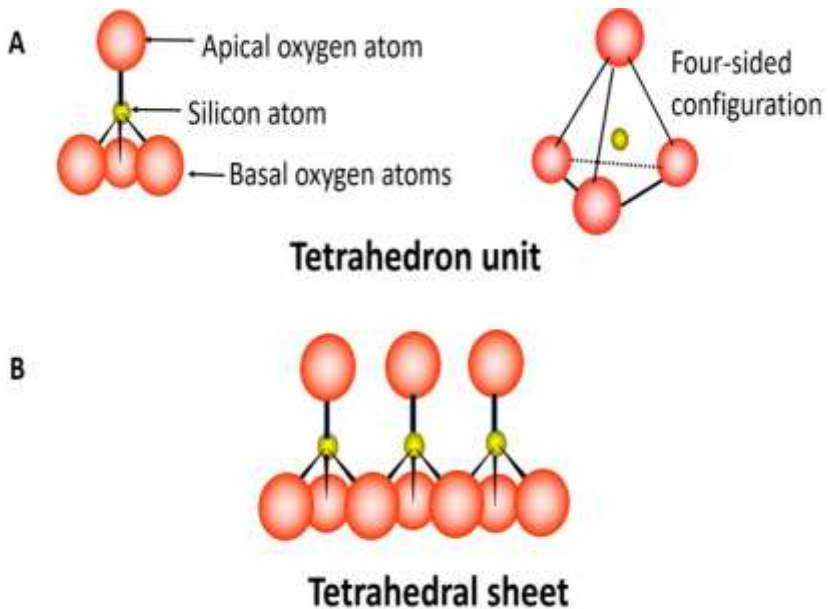
2.2 Filosilikat

Penting untuk dipahami bahwa terdapat perbedaan di antara mineral lempung aluminosilikat (juga disebut filosilikat atau silikat lapisan) yang menyusun sebagian besar koloid mineral dan hal ini memberikan perbedaan substansial dalam sifat-sifat tanah yang penting, seperti pertukaran ion.

Filosilikat (*phyllon* yang berarti daun atau lembaran dalam bahasa Yunani) adalah mineral kristal, dengan struktur

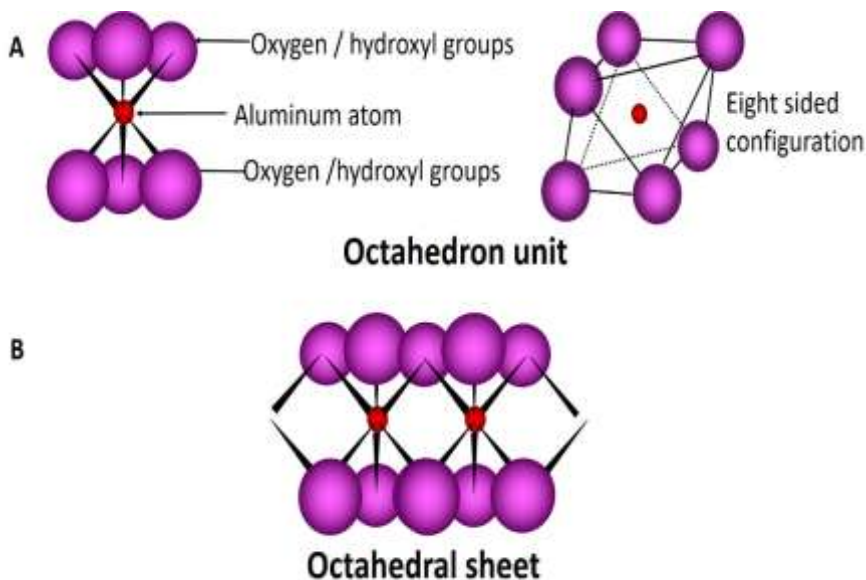
yang terdiri dari lapisan unit atom yang berulang. Ada dua unit dasar yang terdiri dari lapisan oksigen dan gugus hidroksil yang terikat dengan silikon, aluminium, magnesium, dan kation lainnya. Lapisan dasar terdiri dari lembaran tetrahedral dan oktahedral yang muncul dalam kombinasi berbeda untuk membentuk mineral lempung yang berbeda.

Lembaran tetrahedral tersusun dari unit tetrahedron berulang, yang masing-masing biasanya mengandung atom silikon yang dikelilingi oleh empat atom oksigen: satu atom oksigen apikal dan tiga atom oksigen basal yang membentuk konfigurasi empat sisi (tetrahedral) (Gambar 2.2A). Lembaran tetrahedral yang memanjang dalam dua dimensi dibentuk dengan membagi atom oksigen basal di antara atom silikon (Gambar 2.2B).



Gambar 2. 2 Susunan Atom dalam tetrahedron Silika (A) dan Dihubungkan dalam Lembaran Tetrahedral (B) (Tan, 2014).

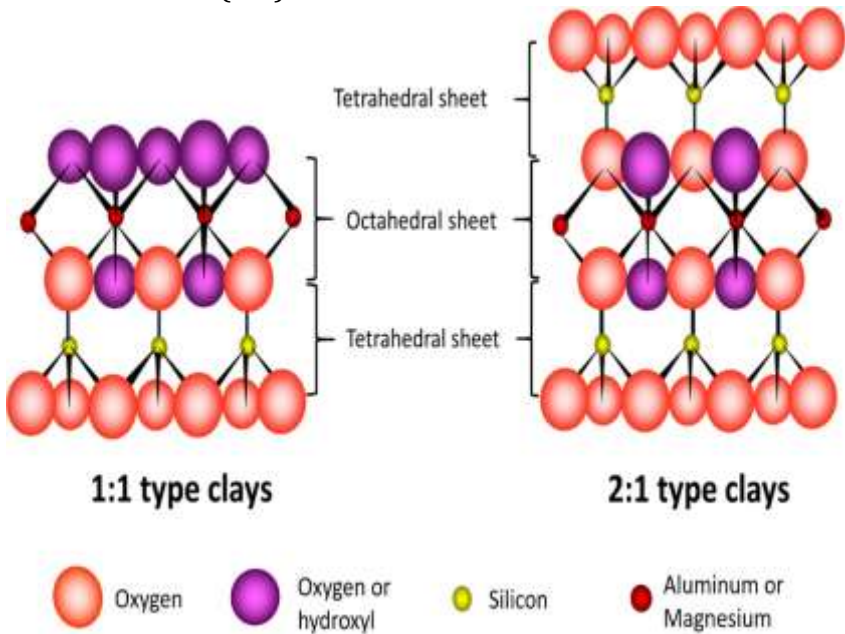
Lembaran oktahedral tersusun dari beberapa unit oktahedron (Gambar 2.3A), setiap unit mengandung atom aluminium (atau magnesium) yang dikelilingi oleh enam atom oksigen dan/atau gugus hidroksil. Tiga atom oksigen (atau gugus hidroksil) terdapat di bidang bawah, tiga atom oksigen (atau gugus hidroksil) yang tersisa terdapat di bidang atas dengan atom aluminium atau magnesium yang diapit di antaranya, membentuk konfigurasi segi delapan (oktahedral). Unit-unit ini bergabung dengan berbagi atom oksigen untuk membentuk lembaran oktahedral yang memanjang dalam dua dimensi (Gambar 2.3B).



Gambar 2. 3 Susunan Atom Dalam Oktahedron (A) dan dalam Lembaran Oktahedral (B) (Tan, 1994)

Lembaran tetrahedral dan oktahedral bergabung membentuk lapisan satuan filosilikat yang berbeda melalui pembagian atom oksigen apikal dari lembaran tetrahedral dengan atom oksigen dalam lembaran oktahedral. Filosilikat yang tersusun dari satu lembar tetrahedral dan satu lembar

oktahedral disebut filosilikat tipe 1:1; yang tersusun dari satu lembar oktahedral yang diapit di antara dua lembar tetrahedral disebut filosilikat tipe 2:1 (Gambar 2.4). Rumus sel satuan ideal untuk mineral lempung 1:1 adalah $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, sedangkan rumus sel satuan mineral lempung 2:1 adalah $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$.



Gambar 2. 4 Susunan Lapisan Mineral Lempung Silikat dengan Perbandingan 1:1 Dan 2:1 (Tan, 1994)

Filosilikat terdiri dari banyak lapisan (tipe 1:1 atau tipe 2:1) yang ditumpuk satu di atas yang lain dengan bentuk ikatan yang berbeda di antara lapisan-lapisan tersebut. Wilayah yang terletak di antara dua lapisan yang berdekatan disebut wilayah interlayer. Perilaku kimia dasar dan sifat fisik dari berbagai filosilikat sebagian besar ditentukan oleh karakteristik yang terkait dengan wilayah interlayer lempung.

2.2.1 Substitusi Isomorfik

Selain luas permukaannya yang besar (Tabel 2.1), filosilikat juga bermuatan listrik karena substitusi kation pusat dalam lembaran tetrahedral atau oktahedral oleh ion lain dengan ukuran yang sama (Tabel 2.2) tetapi valensinya berbeda. Hal ini memberikan muatan negatif bersih pada struktur mineral.

Substitusi isomorf didefinisikan sebagai "penggantian satu atom dengan atom lain yang berukuran serupa dalam suatu struktur kristal tanpa mengganggu atau mengubah struktur kristal mineral" (Departemen Pertanian Kanada, 1976). Ketika kation substitusi memiliki valensi yang lebih rendah daripada kation yang digantikannya, terdapat kelebihan muatan negatif yang diasosiasikan dengan atom oksigen yang mengelilinginya dan oleh karena itu muatan negatif netto diberikan pada struktur tersebut.

Misalnya, aluminium trivalen (Al^{3+}) dapat menggantikan sebagian silikon tetravalen (Si^{4+}) dalam lembaran tetrahedral. Muatan aluminium yang lebih rendah dibandingkan dengan silikon menciptakan defisit muatan dan muatan negatif dalam lembaran tetrahedral struktur tersebut. Demikian pula, dalam lembaran oktahedral, Mg^{2+} , Fe^{2+} , atau kation divalen lainnya, dapat menggantikan sebagian Al trivalen (Al^{3+}), yang menghasilkan muatan negatif ekstra yang diasosiasikan dengan lembaran oktahedral struktur tersebut. Muatan negatif ini menarik kation bermuatan positif ke permukaan mineral untuk menetralkan muatan negatif. Kation penetral muatan ini sebagian besar terletak di dalam wilayah interlayer filosilikat. Kelimpahan lokasi muatan negatif (yaitu, kerapatan muatan), lokasi muatan negatif (lembaran tetrahedral vs. oktahedral), dan jenis kation di wilayah interlayer yang menetralkan muatan (misalnya, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ atau lainnya) menentukan

tingkat di mana filosilikat mengembang atau membengkak, dan kapasitasnya untuk menahan kation.

Tabel 2. 2 Jari-Jari Kation Umum dalam Struktur Filosilikat

Cation	Radius (nm)	Location
Si4+	0.041	tetrahedra
Al3+	0.05	tetrahedra, octahedra, interlayer
Fe3+	0.064	octahedra
Fe2+	0.076	octahedra, interlayer
Mg2+	0.065	octahedra, interlayer
Ca2+	0.099	Interlayer
Na+	0.095	Interlayer
K+	0.133	Interlayer

Sumber: Tan, 1994

Ada sekitar 50 spesies mineral filosilikat, tetapi hanya lima yang umum dikenal. Mineral-mineral ini digambarkan dalam Gambar 2.5 dan dijelaskan sebagai berikut:

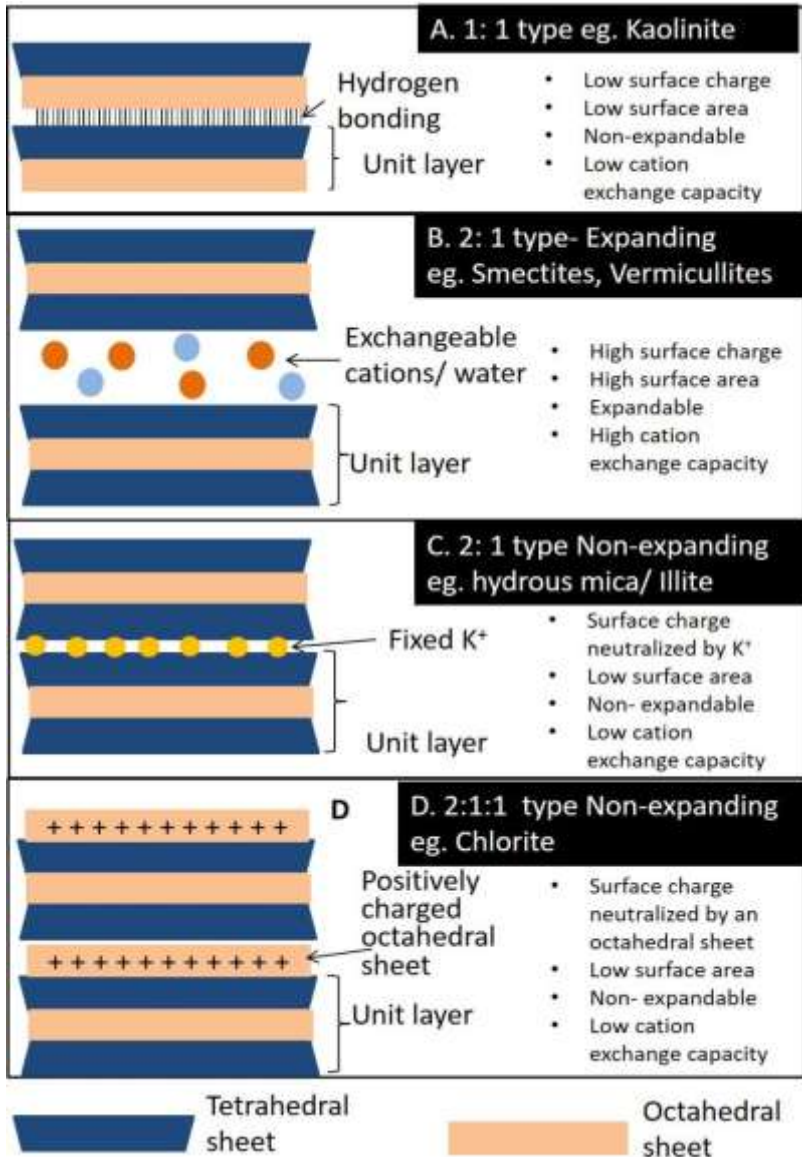
- A. Kaolinit (Gambar 2.5A) adalah mineral lempung tipe 1:1 yang disatukan oleh ikatan hidrogen di wilayah interlayer. Ikatan hidrogen terjadi antara hidroksil dalam lembaran oktahedral dari satu lapisan unit, dan oksigen (basal) dalam lembaran tetrahedral dari lapisan yang berdekatan. Ikatan hidrogen menahan lapisan-lapisan tersebut secara erat untuk membentuk struktur yang sangat stabil. Hal ini dikombinasikan dengan substitusi isomorf yang sangat sedikit menghambat intrusi kation dan air ke wilayah interlayer. Mineral ini tidak dapat dikembangkan karena molekul air tidak dapat

memasuki ruang interlayer. Kaolinit menunjukkan sangat sedikit pembengkakan saat basah, atau penyusutan saat kering. Interlayer tidak terekspos dan oleh karena itu luas permukaan spesifiknya rendah. Dengan hampir tidak adanya substitusi isomorf, mineral kaolinit memiliki muatan permukaan rendah dan kapasitas tukar kation rendah.

- B. Smektit (Gambar 2.5B) adalah kelompok filosilikat tipe 2:1 yang dapat dikembangkan. Montmorillonit dan beidellite adalah dua spesies yang paling umum dari kelompok mineral smektit di tanah Kanada. Jumlah substitusi isomorfik pada kedua mineral tersebut sedang dibandingkan dengan filosilikat tipe 2:1 lainnya (misalnya mika hidrat), dan kedua spesies tersebut dibedakan berdasarkan lokasi muatan lapisan dalam struktur. Sebagian besar muatan lapisan dalam montmorillonit merupakan hasil dari substitusi isomorfik pada lembaran oktahedral, sedangkan pada beidellite muatan lapisan sebagian besar berasal dari substitusi isomorfik pada lembaran tetrahedral. Ikatan hidrogen tidak terjadi pada mineral lempung 2:1 karena tidak ada gugus hidroksil yang terkait dengan oksigen basal dari lembaran tetrahedral dari lapisan yang berdekatan yang saling berhadapan. Dengan demikian, lapisan-lapisan struktural hanya disatukan oleh gaya elektrostatik dari kation penetral yang kebetulan berada di wilayah interlayer untuk menetralkan muatan negatif yang terkait dengan gardu induk isomorfik dalam struktur lapisan. Kation yang dapat dipertukarkan di interlayer biasanya dikelilingi oleh enam molekul air dalam koordinasi oktahedral. Mineral smektit memiliki kapasitas tukar kation yang tinggi. Karena lapisan-lapisannya terikat longgar, baik molekul air maupun kation dapat dengan bebas memasuki ruang interlayer. Oleh karena itu, lempung ini memiliki luas spesifik yang

- tinggi, dan dapat mengembang; membengkak saat basah dan menyusut saat kering.
- C. Vermikulit (Gambar 2.5B) adalah filosilikat jenis 2:1 yang mirip dengan smektit tetapi dengan muatan lapisan antara mika/illit hidrat (lihat di bawah) dan smektit. Mineral tersebut memiliki kemampuan mengembang yang terbatas, dengan karakteristik penyusutan/pembengkakan sedang. Sebagian besar substitusi isomorfik terjadi pada lembaran tetrahedral yang memberikan muatan permukaan tinggi dan kapasitas tukar kation tinggi. Struktur tersebut mampu memerangkap ion K^+ di daerah interlayer yang mirip dengan mika/illit hidrat, tetapi karena muatan lapisannya sedikit lebih rendah, K^+ yang terperangkap dapat dilepaskan kembali ke dalam larutan tanah tidak seperti mika/illit hidrat.
- D. Mika Hidrous juga disebut illite (Gambar 2.5C) adalah mineral lempung jenis 2:1 lainnya, Mika hidrat berasal dari pelapukan sebagian mika, mineral primer yang umum di bebatuan granit Canadian Shield. Struktur mika hidrat/illite mirip dengan smektit dan vermikulit, kecuali bahwa muatan lapisan lebih tinggi dengan substitusi isomorf yang terjadi hampir secara eksklusif di lembaran tetrahedral di mana Al^{3+} digantikan oleh Si^{4+} . Kalium hampir secara eksklusif menempati wilayah interlayer, menetralkan muatan lapisan dan menyatukan struktur. Ion kalium (K^+) hampir cocok dengan lubang berbentuk heksagonal yang terjadi di lembaran tetrahedral lapisan 2:1, dan dengan demikian semakin dekat ke lokasi bermuatan dan mengikat lapisan yang berdekatan dengan kuat. Ini mencegah masuknya air ke wilayah interlayer dan membuat mineral dari kelompok mika tidak dapat dikembangkan. Jadi meskipun muatan lapisan lebih tinggi daripada smektit dan vermikulit, kapasitas tukar kation mika/illit hidrat rendah, karena muatannya dinetralkan oleh K^+ .

- E. Klorit (Gambar 2.5D) adalah filosilikat tipe 2:1:1 (atau 2:2). Mineral tersebut memiliki struktur tipe 2:1, tetapi dengan lembaran oktahedral tambahan—terdiri dari lapisan aluminium, magnesium, atau besi hidroksida dalam koordinasi enam kali lipat (oktahedral)—di wilayah interlayer antara lapisan tipe 2:1. Lapisan hidroksil interlayer ini tidak berbagi oksigen dengan lapisan 2:1 utama, melainkan terikat hidrogen pada lapisan 2:1; akibatnya, mineral tersebut tidak dapat dikembangkan. Jumlah substitusi isomorf dalam struktur bervariasi, tetapi muatan dinetralkan oleh lembaran oktahedral bermuatan positif di interlayer, sehingga kapasitas pertukaran ion rendah.
- F. Aluminosilikat amorf merupakan aluminosilikat lain yang ditemukan di tanah, tetapi ini bukan filosilikat. Ini digambarkan sebagai amorf atau sebagai mineral orde jarak pendek, yang berarti mereka tidak memiliki unit struktural filosilikat yang ditentukan. Alofana dan imogolit adalah contoh mineral aluminosilikat amorf. Mineral ini terbentuk dalam jumlah banyak di tanah abu vulkanik yang ditemukan di negara-negara seperti Jepang dan Selandia Baru, tetapi mereka juga ditemukan dalam jumlah yang sangat kecil di beberapa tanah Podzolik dan Solonchik di Kanada. Aluminosilikat amorf tidak dapat dikembangkan. Mereka sangat kecil (diameter <4 nm) dengan luas permukaan spesifik yang sangat tinggi dan kapasitas pertukaran ion yang sangat tinggi.



Gambar 2. 5 Susunan Lembaran Tetrahedral dan Lembaran Oktahedral dalam Filosilikat Umum Dan Beberapa Sifat Umumnya (Tan, 1994)

2.2.2 Mineral Oksida-Hidroksida

Mineral oksi-hidroksida (seskuioksida) terutama berupa oksida, hidroksida, dan oksida hidrat dari besi, aluminium, dan mangan, dan termasuk fase mineral termuda yang ditemukan di dalam tanah. Beberapa terkristalisasi dengan baik (misalnya, gibbsite, hematite, goethite), sementara yang lain amorf (misalnya, ferrihydrite). Lempung oksida kristal tersusun dari oksigen dan/atau gugus hidroksil, biasanya dalam susunan oktahedral dengan besi, aluminium, atau mangan. Struktur oktahedral mineral-mineral ini disatukan oleh ikatan-H. Oksi-hidroksida non-kristalin (amorf) adalah mineral kompleks besi, aluminium, dan mangan yang biasanya diendapkan dengan sangat cepat dari larutan tanah sebagai respons terhadap siklus pembasahan dan pengeringan. Pengendapan mineral-mineral ini terjadi ketika produk kelarutan untuk kombinasi konsentrasi kation dan anion terlampaui, dan biasanya zat terlarut lainnya termasuk karbonat, fosfat, dan sulfat dapat terperangkap dalam struktur selama presipitasi cepat. Oksida hidroksida amorf bersifat metastabil dan berubah perlahan ke bentuk yang lebih kristal.

Baik mineral hidroksi-kristalin maupun amorf tidak membawa muatan negatif permanen tetapi memiliki muatan permukaan tinggi yang terkait dengan gugus hidroksil permukaan. Dengan demikian, kapasitas tukar hidroksi-hidroksi sangat bergantung pada pH dengan variasi yang disebabkan oleh protonasi gugus hidroksil pada pH rendah yang menghasilkan muatan positif, dan disosiasi gugus hidroksil pada pH tinggi yang menghasilkan muatan negatif. Mineral hidroksi-hidroksi bersifat amfoterik karena kapasitas tukar kationnya yang bervariasi; artinya mereka biasanya memiliki kapasitas

tukar kation bersih pada pH tinggi dan kapasitas tukar anion bersih pada pH rendah.

Oksida-hidroksida biasanya ditemukan dalam jumlah kecil di tanah Kanada yang masih muda, tetapi lebih umum di tanah yang sangat lapuk yang ditemukan di daerah yang hangat dan lembap di bagian lain dunia. Mereka sangat reaktif dan memiliki luas permukaan spesifik yang sangat tinggi. Keberadaan mineral-mineral ini secara signifikan memengaruhi sifat-sifat tanah, seperti penyerapan dan pertukaran ion.

2.2.3 Koloid Organik (Humus)

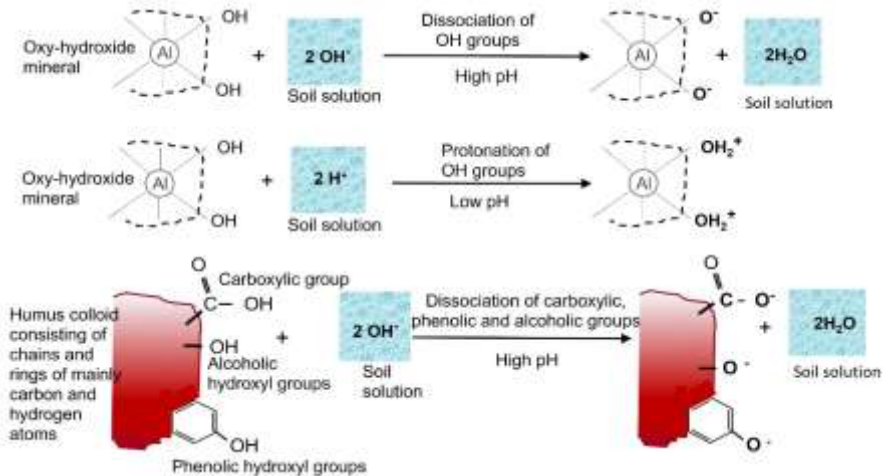
Koloid organik, yang secara umum dikenal sebagai humus, terdiri dari bahan organik yang sangat terurai. Koloid ini memiliki struktur yang kompleks, dan secara kimiawi sebagian besar terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen. Pada skala molekuler, humus dapat digambarkan sebagai campuran polimer kompleks dari komponen organik acak dan mungkin merupakan salah satu aspek kimia tanah yang paling sedikit dipahami. Koloid organik mungkin sangat reaktif secara kimiawi, dengan kapasitas menahan air yang tinggi yang memungkinkan penyerapan air. Dibandingkan dengan koloid anorganik, koloid organik memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar dan muatan permukaan yang lebih tinggi. Muatan permukaan sebagian besar negatif dan bergantung pada pH yang timbul dari disosiasi parsial gugus hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan fenolik, yang dikaitkan dengan struktur karbon pusat dengan berbagai ukuran dan kompleksitas. Pada basis per satuan massa, koloid organik memberikan pengaruh yang lebih besar pada sifat tanah daripada koloid anorganik meskipun kelimpahannya di tanah secara umum jauh lebih sedikit daripada fraksi koloid anorganik.

2.3 Muatan pada Koloid Tanah

Muatan pada koloid tanah timbul dari dua mekanisme berikut:

1. Substitusi isomorfik dalam struktur kristal filosilikat – yang mengarah pada pembentukan muatan permanen yang sebagian besar negatif. Seperti yang dijelaskan sebelumnya dalam bab ini, substitusi isomorfik adalah penggantian satu atom dengan atom lain yang berukuran serupa dalam kisi kristal tanpa mengganggu atau mengubah struktur kristal mineral. Penggantian kation bervalensi lebih tinggi dengan kation bervalensi lebih rendah (misalnya, substitusi Mg^{2+} untuk Al^{3+} dalam lembaran oktahedral) menghasilkan muatan negatif yang tidak seimbang pada permukaan mineral. Muatan negatif ini bersifat permanen dan dengan demikian tidak terpengaruh oleh pH.
2. Protonasi/Deprotonasi gugus fungsi pada permukaan lempung hidroksida-oksida, tepi mineral lempung filosilikat dan senyawa organik, menimbulkan muatan positif dan negatif, disebut muatan yang bergantung pada pH (variabel). Protonasi gugus fungsi terjadi dalam kondisi asam (pH rendah) sedangkan disosiasi proton hidroksil mendominasi dalam kondisi basa (pH tinggi) (Gambar 2.6). Dengan demikian, jumlah relatif muatan permukaan positif dan negatif bervariasi tergantung pada pH tanah, dengan muatan negatif mendominasi dalam kondisi pH tinggi dan muatan positif mendominasi pada kondisi pH rendah. pH di mana jumlah muatan positif sama dengan jumlah muatan negatif disebut sebagai titik muatan proton nol bersih atau titik muatan nol. Permukaan partikel humus mirip dengan koloid anorganik, yang mengandung gugus fungsi (misalnya, karboksil $[-COOH]$, fenolik $[R-OH]$) yang dapat terdisosiasi (deprotonasi) tergantung pada pH, sehingga menimbulkan muatan

negatif pada koloid organik. Ketika pH meningkat, disosiasi menjadi lebih besar, dan muatan negatif meningkat. Pada tanah asam, kondisi mendukung gugus fungsi yang tidak terdisosiasi, sehingga muatan negatif menjadi rendah.



Gambar 2. 6 Muatan yang Bergantung pada Ph yang Bervariasi dalam Lempung Oksihidroksida dan Partikel Humus Tanah (Darshani Kumaragamage, Univ. Winnipeg Dilisensikan Berdasarkan Lisensi Cc By(Atribusi))

2.4 Pengaruh Koloid Tanah terhadap Sifat Tanah

Jumlah dan jenis koloid anorganik dan organik yang ada di dalam tanah memiliki pengaruh yang besar terhadap sifat-sifat tanah. Misalnya, tanah yang mengandung humus dalam proporsi tinggi memiliki kapasitas menahan air yang tinggi. Tanah yang memiliki mineral lempung yang mengembang bebas dalam proporsi tinggi, seperti smektit, menyusut saat kering dan membengkak saat basah. Vertisol, tanah bertekstur halus yang mengandung $>60\%$ lempung yang setidaknya setengahnya adalah smektit, biasanya sangat lengket saat basah dan membentuk retakan lebar saat kering.

Filosilikat, oksi-hidroksida, dan partikel humus memiliki muatan listrik pada permukaannya, yang berkontribusi pada muatan total dalam tanah, dan dengan demikian pada kapasitas tukar kation. Kisaran CEC yang terkait dengan berbagai koloid tanah disajikan dalam Tabel 2.3. Misalnya, tanah yang mengandung 40% lempung smektit dengan CEC $100 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dapat berkontribusi hingga $40 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ pada total CEC tanah. Mengingat kepadatan muatannya yang tinggi, humus dapat menjadi kontributor signifikan terhadap total CEC bahkan di tanah mineral—terutama dalam kondisi pH netral hingga tinggi di mana muatan negatif yang bergantung pada pH mendominasi. Bergantung pada karakteristik humus, pH, dan interaksi humus dengan partikel tanah lainnya, kandungan humus 3% (dengan asumsi CEC $400 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), dapat berkontribusi hingga $12 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ pada CEC tanah. Kontribusi lempung hidroksida besi terhadap CEC juga bergantung pada pH. Namun, dibandingkan dengan humus dan filosilikat dengan CEC tinggi, kontribusi hidroksida besi terhadap CEC tanah dapat diabaikan. Sebaliknya, hidroksida besi bersama dengan silikat lapis tipe 1:1 dapat menunjukkan muatan positif dalam kondisi asam dan dengan demikian merupakan sumber utama kapasitas pertukaran anion.

Tabel 2.3. Kisaran CEC dalam berbagai koloid tanah. Diadaptasi dari Brady dan Weil (2010) dan Soil Survey Staff (2014)

Tabel 2. 3 Kisaran Cec dalam Berbagai Koloid Tanah. (Brady dan Weil, 2010)

Koloid	Kisaran CEC [$\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$]
Kaolinit	2 sampai 16
Klorit	10 sampai 40
Mika Hidrous/Illite	20 sampai 40

Koloid	Kisaran CEC [$\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$]
Montmorilonit	60 sampai 100
Vermikulit	100 sampai 150
Bahan organik (humus)	150 sampai 400
Aluminosilikat amorf	5 sampai 350
Oksida Fe/Al	~ 0 hingga 3

2.5 Pertukaran Kation Di Tanah

Permukaan bermuatan negatif pada koloid tanah menarik kation melalui gaya elektrostatik. Kation yang ditahan oleh koloid tanah pada akhirnya dapat dilepaskan ke larutan tanah melalui pertukaran dengan kation lain dalam larutan tanah. Kation yang paling umum ditahan oleh partikel koloid tanah adalah Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ dan Al^{3+} . Dari semuanya, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , dan Na^+ disebut kation pembentuk basa, sedangkan H^+ dan Al^{3+} adalah kation pembentuk asam. H^+ dan Al^{3+} yang dapat dipertukarkan ditemukan dalam kelimpahan yang meningkat di tanah asam.

Pertukaran kation merupakan proses pertukaran kation dalam larutan tanah dengan kation yang menempel pada permukaan mineral lempung dan humus. Pertukaran kation terjadi berdasarkan muatan per muatan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Representasi Skematis Reaksi Pertukaran Kation dalam Tanah (Darshani Kumaragamage, Univ. Winnipeg Dilisensikan Berdasarkan Lisensi Cc By(Atribusi))

Reaksi pertukaran kation bersifat stoikiometris. Jadi, untuk pertukaran divalen-monovalen (misalnya, pertukaran antara Ca^{2+} dan K^+), satu kation divalen bertukar dengan dua kation monovalen. Reaksi berlangsung cepat (hampir seketika) dan mencapai kesetimbangan dengan cepat. Reaksi pertukaran kation biasanya reversibel, kecuali kation yang dipertukarkan terfiksasi dalam ruang antarlapis filosilikat (misalnya, K^+ dalam mika/illit hidrat).

Kapasitas tukar kation (KTK) didefinisikan sebagai jumlah total kation yang dapat dipertukarkan yang dapat diserap oleh tanah (Brady & Weil, 2010). KTK biasanya dinyatakan dalam sentimol muatan positif per kilogram penular ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) atau milimol muatan positif per kilogram penular ($\text{mmol}(+) \text{ kg}^{-1}$). Jadi tanah dengan KTK $10 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dapat menyerap 10 cmol kation monovalen (misalnya, Na^+) atau 5 cmol kation divalen (misalnya, Ca^{2+}). Dalam contoh ini, jika Na^+ bertukar dengan kation monovalen lain (misalnya, K^+), $10 \text{ cmol } \text{K}^+$ akan bertukar dengan $10 \text{ cmol } \text{Na}^+$. Namun, jika pertukaran dengan kation divalen (misalnya, Ca^{2+}) hanya $5 \text{ cmol } \text{Ca}^{2+}$ yang akan bertukar dengan $10 \text{ cmol } \text{Na}^+$. Karena muatan negatif (termasuk muatan negatif yang bergantung pada pH) dalam koloid tanahlah yang bertanggung jawab terhadap CEC suatu tanah, jumlah koloid anorganik dan organik, jenis mineral lempung yang ada, dan pH tanah

merupakan faktor penentu utama yang mengendalikan CEC suatu tanah.

CEC tanah umumnya diperkirakan dengan menjenuhkan semua situs pertukaran kation dengan kation indeks dan kemudian mengganti dan mengukur jumlah kation indeks yang dilepaskan ke larutan. Langkah pertama adalah menjenuhkan massa tanah yang dikeringkan dalam oven yang diketahui dengan kation indeks (misalnya, Na^+ atau NH_4^+). Ini dicapai dengan menyeimbangkan sampel dengan larutan yang mengandung kation indeks yang dibuffer pada pH 7,0 (biasanya natrium asetat atau amonium asetat). Setelah memastikan bahwa semua kation dipindahkan oleh kation indeks, kation indeks berlebih dihilangkan dari sampel tanah dengan pelindian dengan larutan non-polar seperti etanol 95%. Jumlah kation indeks yang ditahan oleh situs pertukaran dalam sampel kemudian harus ditentukan dengan melindi tanah dengan larutan yang mengandung kation yang berbeda (misalnya, K^+) untuk menggantikan kation indeks pada situs pertukaran. Kemudian konsentrasi kation indeks dalam lindi diukur dan digunakan untuk menghitung CEC tanah (Hendershot et al., 1993).

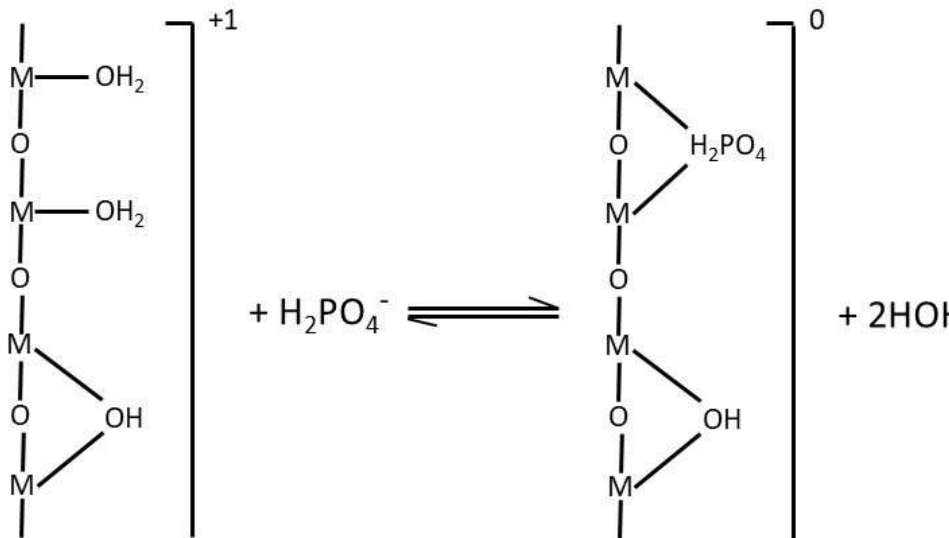
2.6 Adsorpsi dan Pertukaran Anion

Tanah mampu menahan anion dengan cara yang sama seperti menahan kation, khususnya pada kisaran pH yang lebih rendah ketika permukaan beberapa koloid (misalnya, oksid-hidroksida) memiliki muatan positif. Retensi anion melalui penyerapan bervariasi dari satu anion ke anion lainnya. Beberapa anion ditahan melalui mekanisme penyerapan non-spesifik, sementara yang lain ditahan melalui mekanisme penyerapan spesifik.

Adsorpsi non-spesifik mengacu pada anion yang ditahan oleh situs bermuatan positif dan anion ditahan secara lemah melalui gaya elektrostatis. Jenis adsorpsi ini umum untuk

anion seperti klorida (Cl^-) dan NO_3^- . Anion-anion ini ditahan secara lemah pada permukaan bermuatan positif dan mereka dapat dengan bebas bertukar dengan anion lain dalam larutan tanah; akibatnya, mereka dapat dengan mudah hilang melalui pelindian. Agar adsorpsi non-spesifik terjadi, permukaan koloid harus bermuatan positif; dengan demikian, tanah yang mengandung mineral dengan muatan tergantung pH memiliki kapasitas pertukaran anion yang tinggi, terutama pada pH rendah. Tanah di daerah tropis mengandung proporsi tinggi oksida-hidroksida dan kaolinit, yang menunjukkan muatan positif dalam kondisi pH rendah, dengan demikian di tanah ini, adsorpsi anion melalui mekanisme non-spesifik dapat tinggi.

Adsorpsi spesifik terjadi ketika ion terikat secara kimia pada permukaan koloid. Mekanisme bersifat khusus untuk anion yang diadsorpsi. Misalnya, anion fosfat (misalnya, H_2PO_4^-) dapat diadsorpsi secara spesifik ke permukaan koloid tertentu melalui pertukaran hidroksil permukaan pada koloid dengan atom oksigen yang merupakan bagian dari anion (Gambar 2.8). Anion yang terikat kuat tidak bergerak di dalam tanah dan kurang tersedia bagi tanaman. Adsorpsi spesifik hanya bersifat reversibel minimal, yang mengakibatkan hilangnya ion secara permanen dari larutan tanah dan dari penyerapan oleh tanaman. Dalam kasus ekstrem, permukaan mineral asli dapat sepenuhnya dilapisi dengan ion yang diadsorpsi. Anion umum yang tertahan di dalam tanah melalui adsorpsi spesifik adalah fosfat, sulfat, silikat, dan karbonat.



Gambar 2. 8 Mekanisme Penyerapan Spesifik Fosfat Ke Permukaan Koloid (Darshani Kumaragamage, Univ. Winnipeg Dilisensikan Berdasarkan Lisensi Cc By(Atribusi))

DAFTAR PUSTAKA

- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Canada Department of Agriculture; Research Branch 1976. *Glossary of Terms in Soil Science*, Publication 1459.
- Essington, M. E. (2015). *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach* (2nd ed.). CRC Press.
- Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., & Widmer, F. (2020). Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal*, 14(1), 2765-2775.
- Hendershot W.H., Lalonde H., and Duquette M. 1993. Soil Reaction and Exchangeable Acidity. Pp. 167-176 in Carter M.R. (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 1st Edition. Canadian Society of Soil Science. CRC Press, Baton Rouge.
- Newman A.C. and Hayes M.H. 1990. Some properties of clays and of other soil colloids and their influences on soils. In: De Boodt M.F, M.H. Hayes, A. Herbillon (Eds). *Soil colloids and their associations in aggregates*. Springer Science & Business Media; Boston. MA, USA. pp. 39-55.
- Soil Survey Staff. 2014. *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 1001pp.
- Sposito, G. (2016). *The Chemistry of Soils* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Tan, K. H. (2014). *Principles of Soil Chemistry* (4th ed.). CRC Press.

BAB 3

KAPASITAS TUKAR KATION (KTK)

Oleh Sjamsiah

3.1 Pendahuluan

3.1.1 Pentingnya KTK dalam Ilmu Tanah

Kapasitas Tukar Kation (KTK) adalah kemampuan tanah untuk menahan dan menukar kation yang tersedia bagi tanaman. KTK merupakan salah satu sifat kimia tanah yang sangat penting dalam menentukan kesuburan tanah. Tanah yang memiliki KTK tinggi dapat menyimpan lebih banyak unsur hara, sehingga meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman dan mengurangi pencucian unsur hara ke lapisan tanah yang lebih dalam. Sebaliknya, tanah dengan KTK rendah cenderung memiliki kemampuan menahan hara yang lebih lemah, menyebabkan unsur hara mudah tercuci dan mengurangi produktivitas tanah.

3.1.2 Peran KTK dalam Kesuburan Tanah dan Ketersediaan Hara

KTK memainkan peran krusial dalam mendukung kesuburan tanah dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Beberapa peran utama KTK dalam tanah meliputi:

1. Menjaga Ketersediaan Unsur Hara: Tanah dengan KTK tinggi dapat menyerap dan menyimpan kation

- penting seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), kalium (K^+), dan amonium (NH_4^+), sehingga tanaman dapat mengaksesnya secara lebih stabil.
2. Mencegah Pencucian Unsur Hara: Tanah bertekstur kasar, seperti pasir, memiliki KTK rendah sehingga unsur hara mudah tercuci oleh air hujan atau irigasi. Sebaliknya, tanah lempung dan tanah dengan kandungan bahan organik tinggi memiliki KTK lebih besar yang membantu mempertahankan ketersediaan unsur hara dalam jangka waktu lebih lama.
 3. Menyeimbangkan pH Tanah: KTK berperan dalam mengatur keseimbangan ion di dalam tanah, yang dapat memengaruhi keasaman atau kebasaan tanah. Tanah dengan KTK tinggi lebih mampu menahan perubahan pH secara drastis dibandingkan tanah dengan KTK rendah.
 4. Meningkatkan Efisiensi Pemupukan: Tanah dengan KTK tinggi lebih efektif dalam menyerap dan melepaskan pupuk secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman, mengurangi kehilangan nutrisi dan meningkatkan efisiensi pemupukan.

3.2 Konsep Dasar Kapasitas Tukar Kation

3.2.1 Pengertian dan Satuan KTK

Kapasitas Tukar Kation (KTK) didefinisikan sebagai jumlah total kation yang dapat dipertukarkan oleh suatu tanah per satuan berat tanah. KTK biasanya dinyatakan dalam satuan miliekivalen per 100 gram tanah ($\text{meq}/100\text{g}$).

Nilai KTK sangat bergantung pada kandungan bahan organik dan mineral liat dalam tanah. Tanah dengan kandungan lempung tinggi umumnya memiliki KTK lebih tinggi dibandingkan tanah berpasir. Tanah dengan

kandungan bahan organik tinggi juga cenderung memiliki nilai KTK yang besar karena banyaknya gugus fungsional yang mampu menahan kation.

3.2.2 Prinsip Pertukaran Ion dalam Tanah

Pertukaran kation dalam tanah terjadi pada permukaan partikel koloid tanah, terutama mineral liat dan bahan organik. Mekanisme pertukaran ion ini dikendalikan oleh daya tarik elektrostatis antara kation bermuatan positif dan muatan negatif yang terdapat pada koloid tanah. Prinsip dasar dari pertukaran ion adalah sebagai berikut:

1. **Reversibilitas:** Pertukaran kation dalam tanah bersifat reversibel, artinya kation yang diserap oleh koloid tanah dapat kembali ke larutan tanah jika terjadi perubahan konsentrasi ion.
2. **Selektivitas:** Kation dengan muatan lebih tinggi dan jari-jari hidrasi lebih kecil lebih mudah diserap oleh koloid tanah. Urutan daya serap umumnya sebagai berikut: $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ \approx \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$.
3. **Keseimbangan Ion:** KTK mempengaruhi keseimbangan ion dalam tanah. Misalnya, aplikasi pupuk yang mengandung K^+ dalam jumlah besar dapat menyebabkan pelepasan kation lain seperti Mg^{2+} atau Ca^{2+} ke dalam larutan tanah.

3.2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi KTK

Beberapa faktor utama yang mempengaruhi kapasitas tukar kation dalam tanah adalah:

1. **Jenis dan Kandungan Mineral Liat**
 - a Mineral liat memiliki muatan negatif yang mampu menahan kation. Jenis mineral liat sangat berpengaruh terhadap nilai KTK.

- b Kaolinit memiliki KTK rendah (3-15 meq/100g), sedangkan montmorillonit memiliki KTK tinggi (>100 meq/100g).
- 2. Kandungan Bahan Organik
 - a Bahan organik seperti humus memiliki banyak gugus karboksil dan fenolik yang dapat menahan kation.
 - b Tanah dengan kandungan bahan organik tinggi memiliki KTK yang lebih besar dibandingkan tanah mineral murni.
- 3. pH Tanah
 - a KTK tergantung pada pH tanah, karena peningkatan pH menyebabkan deprotonasi gugus fungsional dalam bahan organik dan mineral liat, sehingga meningkatkan jumlah muatan negatif yang tersedia untuk menahan kation.
 - b Pada pH rendah, banyak gugus fungsional yang terprotonasi, sehingga jumlah muatan negatif berkurang dan nilai KTK menjadi lebih rendah.
- 4. Konsentrasi Kation dalam Larutan Tanah

Semakin tinggi konsentrasi suatu kation dalam larutan tanah, semakin besar kemungkinan kation tersebut menggantikan kation lain yang terikat pada koloid tanah.
- 5. Kelembaban Tanah
 - a Kelembaban tanah mempengaruhi mobilitas ion dalam tanah, yang pada akhirnya mempengaruhi dinamika pertukaran kation.
 - b Tanah yang terlalu kering memiliki pertukaran ion yang lebih lambat dibandingkan tanah yang cukup lembab.

3.3 Material Penyusun Tanah dan Kapasitas Tukar Kation (KTK)

3.2.1 Peran Mineral Liat dalam KTK

Mineral liat merupakan komponen utama yang berkontribusi terhadap kapasitas tukar kation (KTK) tanah karena memiliki muatan negatif permanen. Jenis mineral liat sangat menentukan besarnya nilai KTK tanah. Beberapa contoh mineral liat dan nilai KTK-nya adalah:

1. Kaolinit: 3-15 meq/100g tanah
2. Illit: 20-40 meq/100g tanah
3. Montmorillonit: >100 meq/100g tanah (Brady & Weil, 2016).

Mineral liat tipe 2:1, seperti montmorillonit dan vermikulit, memiliki KTK lebih tinggi dibandingkan mineral liat tipe 1:1, seperti kaolinit. Hal ini disebabkan oleh adanya ruang antar lapisan (interlayer) pada mineral 2:1 yang memungkinkan kation tertahan lebih kuat dalam tanah (Sparks, 2003). Selain itu, luas permukaan spesifik yang lebih besar pada mineral 2:1 meningkatkan kemampuannya dalam menukar kation, sehingga tanah dengan kandungan mineral ini cenderung lebih subur.

3.3.1 Bahan Organik dan Hubungannya dengan KTK

Bahan organik dalam tanah, terutama humus, merupakan sumber utama muatan negatif variabel yang dapat meningkatkan KTK tanah. Bahan organik mengandung gugus fungsional seperti karboksil (-COOH) dan fenolik (-OH) yang dapat berdisosiasi dan menghasilkan muatan negatif. Muatan ini memungkinkan tanah menahan dan menukar kation lebih efektif (Weil & Brady, 2017).

Tanah dengan kandungan bahan organik tinggi memiliki nilai KTK yang lebih besar, yang berarti tanah

dapat menyimpan lebih banyak unsur hara esensial bagi tanaman seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , dan NH_4^+ . Selain itu, bahan organik juga meningkatkan stabilitas agregat tanah dan mempertahankan kelembaban, yang berkontribusi pada kesehatan ekosistem tanah secara keseluruhan.

3.3.2 Pengaruh Jenis Mineral dan Ukuran Partikel

Ukuran partikel tanah berpengaruh terhadap luas permukaan spesifik dan kemampuan tanah dalam menahan kation. Tanah dengan tekstur lebih halus, seperti tanah liat, cenderung memiliki nilai KTK yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah berpasir. Hal ini disebabkan oleh luas permukaan spesifik yang lebih besar, memungkinkan lebih banyak kation untuk diadsorpsi pada permukaan mineral tanah (Sumner & Miller, 1996).

Sebagai contoh:

1. Tanah berpasir memiliki KTK rendah karena ukuran partikelnya besar dan luas permukaannya kecil.
2. Tanah lempung dan tanah organik memiliki KTK lebih tinggi karena luas permukaan yang lebih besar dan kandungan bahan organik yang lebih banyak.

Interaksi antara mineral liat dan bahan organik juga mempengaruhi dinamika KTK. Tanah dengan kombinasi kandungan lempung tinggi dan bahan organik yang memadai akan memiliki kapasitas retensi unsur hara yang optimal serta meningkatkan efisiensi pemupukan dalam sistem pertanian.

3.4 Jenis-jenis Kation dalam Pertukaran

3.4.1 Kation utama dalam tanah

Kation yang umum ditemukan dalam tanah berperan dalam mempertahankan keseimbangan hara dan struktur tanah. Kation-kation utama tersebut meliputi:

1. Kalsium (Ca^{2+}): Berperan dalam memperkuat struktur tanah dan meningkatkan stabilitas agregat tanah.
2. Magnesium (Mg^{2+}): Berperan sebagai komponen penting dalam klorofil dan fotosintesis.
3. Kalium (K^+): Esensial dalam regulasi tekanan osmotik dan aktivitas enzim dalam tanaman.
4. Natrium (Na^+): Berperan dalam kesuburan tanah alkali tetapi dalam jumlah berlebih dapat merusak struktur tanah.
5. Aluminium (Al^{3+}): Umumnya ditemukan dalam tanah masam dan dapat bersifat toksik bagi tanaman jika dalam konsentrasi tinggi.
6. Hidrogen (H^+): Berperan dalam menentukan tingkat kemasaman tanah dan mempengaruhi ketersediaan unsur hara.

3.4.2 Kation Esensial vs Kation Tidak Esensial

Kation esensial adalah kation yang diperlukan oleh tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangannya, seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+ . Sedangkan kation tidak esensial, seperti Na^+ dan Al^{3+} , tidak selalu dibutuhkan oleh tanaman dan bahkan dapat berdampak negatif terhadap kesuburan tanah jika kadarnya berlebihan (Fageria et al., 2011).

3.4.3 Interaksi Kation dengan Koloid Tanah

Interaksi antara kation dengan koloid tanah terjadi melalui mekanisme pertukaran kation, di mana kation yang lebih lemah dapat digantikan oleh kation yang lebih kuat dalam kompleks koloid tanah. Misalnya, kation dengan muatan lebih tinggi seperti Al^{3+} dapat menggantikan Ca^{2+} atau Mg^{2+} dari kompleks pertukaran, yang dapat menyebabkan kemasaman tanah meningkat (Brady & Weil, 2016).

Perbandingan kation di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti pH tanah, kandungan bahan organik, serta tekstur tanah. Dengan memahami mekanisme interaksi ini, pengelolaan tanah dapat dilakukan secara lebih efektif untuk meningkatkan kesuburan dan produktivitas pertanian.

3.5 Metode Pengukuran KTK

3.5.1 Metode Analisis Laboratorium

Pengukuran KTK dilakukan di laboratorium dengan berbagai metode yang menggunakan larutan penukar ion untuk menggantikan kation yang teradsorpsi pada partikel tanah. Teknik ini bertujuan untuk menentukan jumlah total kation yang dapat dipertukarkan

3.5.2 Teknik Ekstraksi Kation

Beberapa metode yang umum digunakan meliputi:

1. Metode NH_4OAc (Amonium Asetat, pH 7.0): Paling umum digunakan untuk tanah mineral karena mampu mengekstrak kation yang tersedia. Menggunakan larutan NH_4OAc untuk menggantikan kation yang terikat pada koloid tanah.
2. Metode $\text{BaCl}_2\text{-TEA}$ (Barium Klorida-Trietanolamina): Cocok untuk tanah dengan kandungan bahan organik tinggi. BaCl_2 menggantikan kation tanah, lalu kation yang dilepaskan dianalisis
3. Metode Cobalthexamine: Digunakan untuk tanah dengan kandungan lempung tinggi. Menggunakan kompleks Cobalthexamine untuk menggantikan kation tanah.

3.5.3 Interpretasi Hasil Pengukuran

Hasil pengukuran KTK dikategorikan sebagai berikut:

1. KTK <10 meq/100g: Tanah berpasir, kesuburan rendah.
2. KTK 10-30 meq/100g: Tanah lempung, kesuburan sedang.
3. KTK >30 meq/100g: Tanah liat montmorillonit, kesuburan tinggi.

3.6 Pengaruh KTK terhadap Kesuburan Tanah

Kapasitas Tukar Kation (KTK) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kesuburan tanah karena berkaitan erat dengan ketersediaan unsur hara, retensi kation, dan efisiensi pemupukan. Tanah dengan nilai KTK yang tinggi cenderung lebih subur karena mampu menyimpan lebih banyak unsur hara esensial bagi tanaman serta mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian.

3.6.1 Hubungan KTK dengan Ketersediaan Unsur

KTK berperan dalam menentukan ketersediaan unsur hara bagi tanaman karena mempengaruhi jumlah kation yang dapat diserap oleh akar. Unsur hara makro seperti kalium (K^+), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan amonium (NH_4^+) tersedia dalam bentuk kation yang terikat pada kompleks pertukaran tanah. Semakin tinggi KTK, semakin besar jumlah kation yang dapat disimpan dan dilepaskan secara bertahap sesuai dengan kebutuhan tanaman (Brady & Weil, 2016).

Tanah dengan KTK tinggi cenderung memiliki daya serap hara yang lebih baik karena dapat mempertahankan kation dalam zona perakaran, mengurangi kemungkinan defisiensi unsur hara, serta menyeimbangkan kebutuhan tanaman dalam jangka panjang. Sebaliknya, tanah dengan KTK rendah (misalnya

tanah berpasir) memiliki kapasitas penyimpanan kation yang terbatas, sehingga unsur hara lebih cepat hilang akibat pencucian dan perlu sering dilakukan pemupukan (Weil & Brady, 2017).

3.6.2 Peran KTK dalam Mengurangi Kehilangan Unsur Hara Akibat Pencucian

Pencucian unsur hara terjadi ketika air mengalir melalui tanah dan membawa kation esensial ke lapisan yang lebih dalam sehingga tidak lagi tersedia bagi akar tanaman. Tanah dengan KTK tinggi, seperti tanah lempung dan tanah organik, mampu menahan kation lebih kuat dibandingkan tanah berpasir yang memiliki KTK rendah (Sparks, 2003).

Beberapa faktor yang mempengaruhi kemampuan tanah dalam mengurangi kehilangan unsur hara akibat pencucian adalah:

1. **Tekstur tanah:** Tanah berpasir lebih rentan terhadap pencucian unsur hara karena memiliki pori-pori besar dan KTK rendah. Sebaliknya, tanah lempung dengan mineral liat yang tinggi mampu mempertahankan lebih banyak kation.
2. **Kandungan bahan organik:** Humus meningkatkan KTK dan memperbaiki daya serap tanah terhadap unsur hara, sehingga mengurangi kehilangan akibat pencucian (Sumner & Miller, 1996).
3. **pH tanah:** Pada pH yang lebih tinggi, KTK cenderung meningkat, sehingga kation seperti kalsium dan magnesium lebih stabil dan tidak mudah tercuci.

Dengan memahami peran KTK dalam retensi unsur hara, petani dan praktisi pertanian dapat mengoptimalkan strategi manajemen kesuburan tanah untuk meningkatkan efisiensi pemupukan dan mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian.

3.6.3 Implikasi dalam Manajemen Pemupukan

Manajemen pemupukan yang efektif harus mempertimbangkan nilai KTK tanah agar aplikasi pupuk dapat disesuaikan dengan kapasitas tanah dalam menyimpan dan melepaskan unsur hara. Tanah dengan KTK rendah memerlukan pemupukan yang lebih sering dalam dosis kecil agar nutrisi tidak cepat hilang, sementara tanah dengan KTK tinggi memungkinkan aplikasi pupuk dalam jumlah lebih besar dengan frekuensi lebih jarang.

Strategi pemupukan berdasarkan KTK:

1. Tanah dengan KTK rendah (misalnya tanah berpasir, $\text{KTK} < 10 \text{ meq}/100\text{g}$)
 - a. Gunakan pupuk dalam dosis kecil tetapi lebih sering untuk mengurangi kehilangan hara.
 - b. Tambahkan bahan organik (kompos atau pupuk kandang) untuk meningkatkan KTK dan daya simpan nutrisi.
 - c. Gunakan pupuk *slow-release* (pelepasan lambat) untuk menghindari pencucian unsur hara.
2. Tanah dengan KTK sedang ($\text{KTK } 10\text{-}30 \text{ meq}/100\text{g}$, seperti tanah lempung berpasir)
 - a. Kombinasikan pupuk organik dan anorganik untuk meningkatkan efisiensi pemupukan.
 - b. Pastikan aplikasi pupuk dilakukan sebelum hujan deras untuk menghindari pencucian.
3. Tanah dengan KTK tinggi ($\text{KTK} > 30 \text{ meq}/100\text{g}$, seperti tanah lempung atau tanah organik tinggi)
 - a. Aplikasi pupuk dapat dilakukan dalam jumlah lebih besar tetapi dengan frekuensi yang lebih jarang.
 - b. Perhatikan keseimbangan kation agar tidak terjadi kejenuhan satu unsur tertentu yang dapat menghambat penyerapan unsur lainnya (misalnya dominasi K^+ dapat menghambat penyerapan Ca^{2+} dan Mg^{2+}).

Pemahaman tentang KTK memungkinkan manajemen pemupukan yang lebih efisien, mengurangi limbah pupuk, serta meningkatkan keberlanjutan pertanian dengan memastikan unsur hara tetap tersedia bagi tanaman dalam jangka panjang (Mengel & Kirkby, 2001).

3.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi KTK

Kapasitas Tukar Kation (KTK) tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, termasuk pH tanah, tekstur tanah, kandungan bahan organik, serta aktivitas mikroorganisme. Faktor-faktor ini berperan dalam menentukan jumlah dan jenis kation yang dapat dipertukarkan, sehingga mempengaruhi kesuburan tanah dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman.

3.7.1 pH Tanah dan Dampaknya terhadap KTK

pH tanah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai KTK karena mempengaruhi muatan permukaan partikel tanah, terutama pada mineral liat dan bahan organik. Pada pH rendah (asam), banyak gugus fungsi pada bahan organik dan mineral liat yang tidak terdisosiasi, sehingga jumlah muatan negatif yang tersedia untuk mengikat kation berkurang. Sebaliknya, pada pH yang lebih tinggi (basa), lebih banyak gugus karboksil ($-\text{COOH}$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) yang terdisosiasi, menghasilkan muatan negatif yang lebih banyak dan meningkatkan KTK (Brady & Weil, 2016).

Dampak pH terhadap KTK:

1. Tanah masam ($\text{pH} < 5,5$): KTK cenderung lebih rendah karena ion H^+ dalam jumlah tinggi menetralkan muatan negatif tanah. Pada kondisi ini, kation bermanfaat seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} sering tergantikan oleh Al^{3+} yang bersifat toksik bagi tanaman.

2. Tanah netral hingga sedikit basa (pH 6-7,5): KTK lebih optimal karena ion H^+ lebih sedikit, memungkinkan tanah menyerap lebih banyak kation esensial bagi tanaman.
3. Tanah sangat basa (pH >8,5): KTK dapat tetap tinggi, tetapi dominasi ion Na^+ pada tanah alkali dapat menyebabkan degradasi struktur tanah dan menurunkan produktivitasnya.

Untuk mengelola KTK berdasarkan pH tanah, beberapa tindakan yang dapat dilakukan adalah:

1. Menambahkan kapur ($CaCO_3$) pada tanah masam untuk menaikkan pH dan meningkatkan KTK.
2. Menggunakan bahan organik seperti kompos untuk meningkatkan KTK pada tanah dengan pH rendah hingga netral.
3. Menghindari akumulasi natrium pada tanah basa dengan mencuci tanah menggunakan gypsum ($CaSO_4$).

3.7.2 Tekstur Tanah dan Kandungan Bahan Organik

Tekstur tanah, yang ditentukan oleh proporsi pasir, debu, dan lempung, sangat mempengaruhi KTK. Tanah dengan kandungan lempung tinggi memiliki nilai KTK yang lebih besar dibandingkan tanah berpasir karena luas permukaan spesifik yang lebih besar untuk mengadsorpsi kation (Sparks, 2003).

KTK berdasarkan tekstur tanah:

1. Tanah berpasir: Memiliki KTK rendah (<5 meq/100g) karena luas permukaan spesifiknya kecil dan minimnya muatan negatif. Unsur hara mudah tercuci, sehingga sering memerlukan pemupukan berulang.
2. Tanah lempung berdebu: KTK sedang (10-30 meq/100g), dengan kapasitas penyimpanan kation yang lebih baik dibandingkan tanah berpasir.

3. Tanah berlempung tinggi: KTK tinggi (>30 meq/100g), mampu menyimpan lebih banyak unsur hara dan lebih stabil terhadap pencucian.

Selain mineral liat, bahan organik juga berperan penting dalam meningkatkan KTK. Humus, yang merupakan bentuk stabil dari bahan organik, mengandung gugus karboksil dan fenolik yang dapat melepaskan dan menahan kation. Tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi cenderung memiliki nilai KTK yang lebih besar dibandingkan tanah dengan kandungan organik rendah (Weil & Brady, 2017).

Untuk meningkatkan KTK melalui pengelolaan tekstur tanah dan bahan organik, dapat dilakukan:

1. Penambahan kompos atau pupuk kandang untuk meningkatkan kandungan bahan organik.
2. Penggunaan teknik konservasi tanah, seperti mulsa dan rotasi tanaman, untuk menjaga kandungan bahan organik tetap tinggi.
3. Aplikasi tanah liat pada tanah berpasir untuk meningkatkan KTK dan retensi hara.

3.7.3 Aktivitas Mikroorganisme dalam Meningkatkan atau Menurunkan KTK

Mikroorganisme tanah, terutama bakteri dan fungi, memainkan peran penting dalam memodifikasi KTK melalui proses biokimia yang mempengaruhi ketersediaan kation.

1. Mikroorganisme meningkatkan KTK melalui:
 - a Produksi bahan organik: Mikroba dekomposer memecah sisa tanaman menjadi humus, yang meningkatkan KTK.
 - b Eksudat mikroba: Beberapa bakteri menghasilkan senyawa seperti polisakarida

- yang membantu agregasi tanah, meningkatkan stabilitas dan daya tukar kation.
- c Fiksasi nitrogen: Rhizobia dan Azotobacter mengikat nitrogen dari udara dan menghasilkan NH_4^+ , yang dapat dipertukarkan dalam tanah.
- 2. Mikroorganisme menurunkan KTK melalui:
 - a Mineralisasi bahan organik berlebihan: Jika bahan organik mengalami dekomposisi terlalu cepat tanpa penggantian yang cukup, KTK dapat menurun.
 - b Produksi asam organik: Mikroba seperti fungi mikoriza menghasilkan asam organik yang dapat meningkatkan pencucian kation, mengurangi KTK tanah dalam jangka panjang.

Manajemen mikroorganisme dalam tanah dapat dilakukan dengan:

1. Menjaga keseimbangan bahan organik melalui penambahan pupuk hijau dan kompos.
2. Menggunakan inokulan mikroba tanah seperti mikoriza dan bakteri pengikat nitrogen untuk meningkatkan efisiensi hara dan stabilitas tanah.
3. Menghindari penggunaan pestisida berlebihan, yang dapat mengurangi populasi mikroba bermanfaat dalam tanah.

3.8 Aplikasi dalam Manajemen Tanah

3.8.1 Pengelolaan Tanah untuk Meningkatkan KTK

Kapasitas Tukar Kation (KTK) merupakan indikator penting dalam menentukan kesuburan tanah. Tanah dengan KTK tinggi memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman. Oleh karena itu, pengelolaan tanah yang tepat untuk meningkatkan KTK sangat krusial dalam praktik pertanian.

➤ **Penambahan Bahan Organik**

Salah satu metode efektif untuk meningkatkan KTK adalah melalui penambahan bahan organik ke dalam tanah. Bahan organik, seperti kompos, pupuk kandang, atau sisa tanaman, dapat meningkatkan muatan negatif tanah, sehingga meningkatkan kapasitasnya untuk menjerap kation nutrisi. Selain itu, bahan organik juga memperbaiki struktur tanah, meningkatkan aerasi, dan kapasitas pegang air. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan bahan organik mampu meningkatkan pH dan KTK tanah secara signifikan

➤ **Penggunaan Pupuk Organik**

Pupuk organik tidak hanya menyediakan nutrisi bagi tanaman tetapi juga berperan dalam meningkatkan KTK tanah. Penggunaan rutin pupuk organik dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah, yang pada gilirannya meningkatkan KTK. Selain itu, pupuk organik membantu meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam dekomposisi bahan organik dan pembentukan struktur tanah yang lebih baik.

➤ **Rotasi Tanaman dan Penanaman Tanaman Penutup**

Rotasi tanaman dan penanaman tanaman penutup (*cover crops*) dapat membantu meningkatkan KTK tanah. Praktik ini mencegah erosi, meningkatkan kandungan bahan organik, dan memperbaiki struktur tanah. Tanaman penutup seperti legum dapat menambah nitrogen ke dalam tanah melalui fiksasi nitrogen, yang berkontribusi pada peningkatan kesuburan dan KTK tanah.

3.8.2 Teknik Perbaikan Tanah dengan Bahan Organik dan Mineral Tambahan

➤ **Aplikasi Biochar**

Biochar adalah arang yang dihasilkan dari pirolisis bahan organik dan digunakan sebagai

amelioran tanah. Penambahan biochar ke dalam tanah telah terbukti meningkatkan KTK secara signifikan. Biochar memiliki struktur poros yang memberikan muatan negatif, sehingga meningkatkan kemampuan tanah dalam penyerapan. Selain itu, biochar juga meningkatkan retensi air dan ketersediaan hara bagi tanaman

➤ **Penggunaan Mineral Tambahan**

Selain bahan organik, penambahan mineral tertentu dapat meningkatkan KTK tanah. Zeolit, misalnya, adalah mineral aluminosilikat yang memiliki struktur berpori dan muatan negatif tinggi. Penambahan zeolit ke dalam tanah dapat meningkatkan KTK dan kapasitas pegang air, serta mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian. Studi menunjukkan bahwa penambahan hancuran batuan zeolit secara signifikan dapat meningkatkan KTK tanah

➤ **Pengolahan Tanah yang Tepat**

Pengolahan tanah yang tepat juga berperan dalam meningkatkan KTK. Pengolahan minimum atau tanpa olah tanah dapat mempertahankan struktur tanah dan kandungan bahan organik, sehingga mendukung peningkatan KTK. Sebaliknya, pengolahan tanah yang berlebihan dapat merusak struktur tanah, mengurangi kandungan bahan organik, dan menurunkan KTK. Oleh karena itu, praktik pengolahan tanah yang konservatif dianjurkan untuk menjaga dan meningkatkan KTK tanah.

3.8.3 Dampak Pengolahan Tanah terhadap KTK

➤ **Pengolahan Tanah Intensif**

Pengolahan tanah yang intensif, seperti pembajakan dalam dan frekuensi olah tanah yang tinggi, dapat berdampak negatif terhadap KTK. Praktik ini dapat menyebabkan dekomposisi bahan

organik yang lebih cepat, meningkatkan erosi, dan mengurangi kandungan bahan organik tanah. Akibatnya, KTK tanah menurun, dan kemampuan tanah dalam menahan serta menyediakan nutrisi bagi tanaman berkurang.

➤ Pengolahan Tanah Konservatif

Sebaliknya, pengolahan tanah konservatif, seperti olah tanah minimum atau tanpa olah tanah, dapat membantu mempertahankan atau bahkan meningkatkan KTK. Praktik ini meminimalkan gangguan pada struktur tanah, mempertahankan residu tanaman di permukaan tanah, dan meningkatkan kandungan bahan organik. Dengan demikian, KTK tanah dapat dipertahankan atau ditingkatkan, yang berdampak positif pada kesuburan tanah dan produktivitas tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Brady, N.C. & Weil, R.R. 2016. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.
- BSIP BERKARYA: BIMTEK SERI 6 KAPASITAS KTK TANAH DAN IMPLIKASI PENGELOLAANNYA UNTUK PERTANIAN. (n.d.) [Online]. Available at: <https://tanahpupuk.bsip.pertanian.go.id> (Accessed: 22 February 2025).
- Fageria, N.K., Gheyi, H.R., & Moreira, A. 2011. Nutrient bioavailability in salt affected soils. *Journal of Plant Nutrition*, 34(7), 945–962
- Geller, J.B. dan Leal-Dutra, C.A., 2022. Cation exchange capacity and reactions. University of Vermont: Elsevier eBooks.
- Horn, A. L., Düring, R. A., & Gäth, S. 2005. Comparison of the prediction efficiency of two pedotransfer functions for soil cation-exchange capacity. *Journal of Plant Nutrition and Soil*,
- Jaremko, D., & Kalembasa, D. 2014. A Comparison of Methods for the Determination of Cation Exchange Capacity of Soils. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 21(4), 669–680. DOI: 10.2478/ECES-2014-0036
- Lumbanraja P & Harahap E.M . 2015. Perbaikan Kapasitas Pegang Air dan Kapasitas Tukar Kation Tanah Berpasir dengan Aplikasi Pupuk Kandang pada Ultisol Simalingkar.
- Mengel, K., & Kirkby, E.A. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. Springer.

- Ouyang, N., Zhang, P., Zhang, Y., Sheng, H., Zhou, Q., Huang, Y. dan Yu, Z., 2023. Cation Exchange Properties of Subsurface Soil in Mid-Subtropical China: Variations, Correlation with Soil-Forming Factors, and Prediction. *Agronomy*, 13(3), <https://doi.org/10.3390/agronomy13030741>.
- Perbaikan Kesuburan Tanah Melalui Penambahan Bahan Organik. (n.d.) [Online]. Available at: <https://lmsspada.kemdiktisaintek.go.id> (Accessed: 22 February 2025).
- Potoczny, K., Miotlinski, K., & Kowalczyk, A. 2009. Cation exchange capacity and the influence of ion exchange on chemical composition of groundwater in the buried valley in the Raciborz area. *Hydrogeological Journal*, 17(1), 45–58.
- Sparks, D.L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press.
- Sumner, M.E. & Miller, W.P. 1996. *Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients*. CRC Press.
- Weil, R.R. & Brady, N.C. 2017. *Elements of the Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.
- Widyastuti, E., & Sinukaban, N. 1995. *Hubungan antara Kandungan Bahan Organik, Liat dan pH dengan Kapasitas Tukar Kation pada Berbagai Jenis Tanah*

BAB 4

KEJENUHAN BASA

Oleh Merpiseldin Nitsae

4.1 Pengenalan Dasar Teori Kejenuhan Basa

Kejenuhan basa (KB) merupakan perbandingan dari jumlah kation basa yang ditukarkan dengan Kapasitas Tukar Kation (KTK). Kation-kation basa yang menunjukkan nilai KB adalah kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan Natrium (Na). Kation basa umumnya terdapat dalam kompleks jerapan koloid. Pada dasarnya kejenuhan basa merupakan bagian dari kesuburan tanah. Kesuburan tanah sendiri dicirikan oleh proses fisik, kimiawi, dan biologis yang mengontrol ketersediaan nutrisi tanaman. Pengetahuan tentang proses dan interaksi ini sangat penting untuk mengoptimalkan pasokan hara dan produktivitas tanaman. Tanaman menyerap unsur hara yang terlarut dalam larutan tanah. Unsur hara dalam residu tanaman yang tertinggal setelah panen pada akhirnya dikembalikan ke tanah dan mengalami reaksi yang sama seperti unsur hara pupuk. Meskipun siklus ini bervariasi diantara unsur hara, memahami dinamika unsur hara dalam sistem tanah-tanaman-atmosfer sangat penting untuk keberhasilan pengelolaan unsur hara.

Sejak tahun 1950-an, terdapat tiga filosofi Amerika Serikat yang mendasari rekomendasi kesuburan tanah terkait basa kation tertentu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+). Ketiga pendekatan tersebut meliputi: membangun dan mempertahankan (*build and maintain*), tingkat kecukupan (*sufficiency level*), serta rasio kejenuhan basa kation (*Base Cation Saturation*

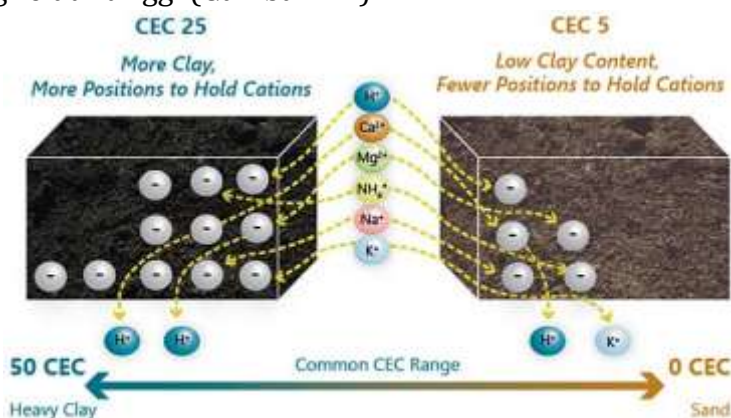
Ratio/BCSR). Teori mengenai BCSR "ideal" dalam tanah telah banyak didiskusikan dan digunakan secara terbatas oleh beberapa laboratorium uji tanah untuk memberikan rekomendasi kesuburan. Konsep "ideal" ini pertama kali dikemukakan oleh para peneliti dari New Jersey pada tahun 1940-an dan semakin diperkuat oleh William Albrecht, seorang profesor dari University of Missouri. Teori ini didasarkan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Loew dan May (1901), yang menyarankan bahwa kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) sebaiknya memiliki rasio 5:4 untuk pertumbuhan tanaman yang optimal.

Namun, teori ini telah menjadi subjek perdebatan besar terkait manfaatnya dalam meningkatkan hasil panen dan keuntungan petani. Berbagai penelitian menemukan kelemahan dalam metode BCSR dan tidak menunjukkan peningkatan hasil panen yang terbukti secara ilmiah. Sebaliknya, terdapat lebih banyak bukti penelitian yang mendukung pendekatan kecukupan serta membangun dan mempertahankan kesuburan tanah. Meskipun demikian, beberapa konsultan dan pemasok produk pertanian masih menggunakan metode BCSR untuk memberikan rekomendasi kesuburan. Semua rekomendasi kesuburan tanah dari universitas berbasis penelitian mengadopsi pendekatan kecukupan atau membangun dan mempertahankan kesuburan tanah.

Untuk memahami teori di balik metode BCSR, khususnya rasio Ca : Mg, seseorang harus memahami kapasitas pertukaran kation (*Cation Exchange Capacity/ CEC*). Kation adalah ion bermuatan positif dalam larutan tanah (Ca^{2+} , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). CEC didefinisikan sebagai jumlah total kation, dalam satuan miliekuivalen (meq), yang terikat pada komponen tanah melalui gaya tarik elektrostatis dan dapat dipertukarkan dengan kation dalam larutan tanah. Kapasitas pertukaran kation suatu jenis tanah tertentu bergantung pada tiga faktor utama:

- Jumlah kandungan lempung (tekstur tanah)
- Jenis lempung
- Jumlah kandungan bahan organik (*Organic Matter*)

Karena faktor-faktor ini, kapasitas pertukaran kation (CEC) dalam suatu tanah dapat bervariasi antara 0 hingga 50 meq/100g tanah. Tanah dengan CEC rendah biasanya memiliki fraksi pasir yang tinggi dan kandungan bahan organik yang rendah, sedangkan tanah dengan CEC tinggi umumnya memiliki fraksi lempung dan/atau bahan organik yang relatif tinggi (Gambar 4.1).



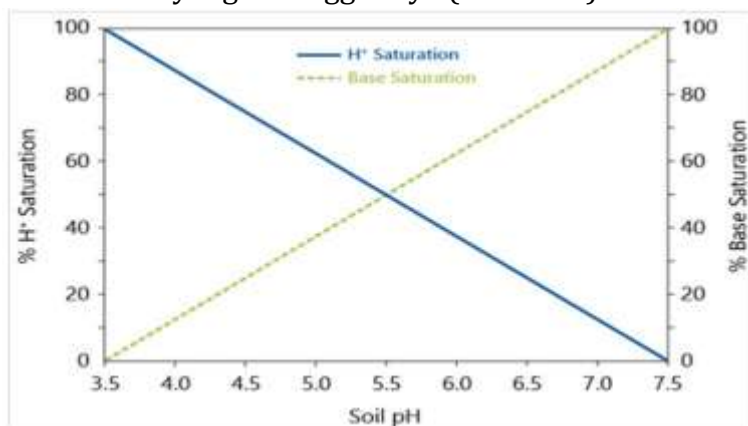
Gambar 4. 1 Ilustrasi Kapasitas Pertukaran Kation (CEC) Tanah. Diadaptasi Dari Spectrum Analytics Inc.

(Sumber: <https://www.pioneer.com/us/agronomy/Base-Saturation-Cation-Exchange-Capacity.html>)

Pemahaman lebih lanjut tentang kejenuhan basa sangat penting dalam metode BCSR. Kejenuhan basa adalah jumlah total kation basa (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , dan Na^{+}) yang terikat pada situs pertukaran tanah, dibagi dengan total kapasitas pertukaran kation (CEC), dan dinyatakan dalam bentuk persentase. Kejenuhan basa dapat dijelaskan melalui Gambar 4.2. Karena alasan ini, jumlah kation pada situs pertukaran akan terbatas ketika pH tanah menurun atau menjadi lebih asam, akibat meningkatnya jumlah ion H^{+} pada situs pertukaran dan dalam larutan tanah.

4.2 Rasio Kejenuhan Basa sesuai Metode Base Cation Saturation Ratio (BCSR)

Para pendukung BCSR berpendapat bahwa terdapat rasio kation basa (Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+) yang harus menempati situs pertukaran kation dalam tanah, jika tidak, pertumbuhan tanaman akan terhambat. Kejenuhan basa (KB) dari kompleks pertukaran kation harus terdiri dari 65% Ca^{2+} , 10% Mg^{2+} , 5% K^+ , dan 20% kombinasi H^+ , Na^+ , dan NH_4^+ . Hal ini menghasilkan rasio kejenuhan kation basa sebesar 6,5:1 untuk Ca : Mg; 13:1 untuk Ca : K; dan 2:1 untuk Mg:K, yang juga dapat dinyatakan sebagai 13:2:1 untuk Ca : Mg : K dan disebut sebagai rasio “ideal”. Kemungkinan ada rentang jumlah Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+ yang dapat menempati situs pertukaran dan tetap memungkinkan pertumbuhan tanaman yang optimal. Namun, rentang tersebut tidak pernah dilaporkan secara spesifik, sehingga banyak laboratorium uji tanah menganggap nilai-nilai ini sebagai angka absolut tanpa margin kesalahan. Rentang KB sepenuhnya didasarkan pada teori perbandingan di atas, bukan pada eksperimen lapangan atau laboratorium yang sesungguhnya (Tabel 4.1).



Gambar 4. 2 Hubungan Antara Kejenuhan Basa dan H⁺ Pada Kapasitas Tukar Kation di Berbagai Ph Tanah (Sumber: <https://www.pioneer.com/us/agronomy/base-saturation-cation-exchange-capacity.html>.)

Metode BCSR berfokus pada menjaga tiga unsur hara ini mendekati rasio kationik tertentu (Tabel 4.1) tanpa mempertimbangkan hasil uji tanah, jenis tanah, jenis tanaman, dan potensi hasil panen. Namun, karena pendekatan BCSR hanya berfokus pada pemeliharaan rasio spesifik antara Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+ (13:2:1), jumlah unsur hara ini dalam tanah dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada CEC tanah yang bersangkutan dan kejenuhan basa yang sebenarnya (Tabel 4.2).

Tabel 4. 1 Kejenuhan Basa yang Telah Dilaporkan Sebelumnya dan Rasio Kejenuhan Kation Basa (BCSR) untuk Tanah “Ideal.”

Unsur Hara	Bear dkk.	Graham	Baker & Amacher
Kejenuhan Basa (%)			
Ca	65	65-85	60-80
Mg	10	6-12	10-20
K	5	2-5	2-5
Rasio Kejenuhan Basa Kation (BCSR)			
Ca : Mg	6,5:1	5,4:1 – 14,1:1	3,0:1 – 8,0:1
Ca : K	13:1	13,0:1 – 42,5:1	12,0:1 – 40,0:1
Mg : K	2:1	1,2:1 – 6,0:1	2,0:1 – 10,0:1

Tabel 4. 2 Perbandingan Dua Jenis Tanah dengan Kejenuhan Basa dan CEC yang Sama dan Rasio "Ideal" 13:2:1 untuk Ca : Mg : K tetapi Perkiraan Kadar Kalsium, Magnesium, dan Kalium.

Unsur Hara	KB (%)	CEC 40 meq/100g	CEC 5 meq/100g	KB (%)	Soil #1	Soil #2
		Perkiraan Tingkat uji tanah			Perkiraan Tingkat uji tanah	
Ca	65	5200	650	32,5	650	325
Mg	10	480	60	5	60	30
K	5	780	98	2,5	98	49
Na+H+etc	20	--	--	60	--	--

4.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kejenuhan Basa

Kejenuhan basa dalam tanah merupakan indikator penting bagi kesehatan dan kesuburan tanah. KB mengukur persentase situs pertukaran tanah yang ditempati oleh ion bermuatan positif (kation), seperti kalsium, magnesium, kalium, dan natrium. KB yang tinggi menunjukkan bahwa tanah memiliki pasokan nutrisi esensial yang baik, sementara KB yang rendah menandakan bahwa tanah kekurangan nutrisi tersebut. KB yang ideal untuk sebagian besar tanaman berkisar antara 60% hingga 80%. Kisaran ini memberikan keseimbangan nutrisi yang baik sekaligus meminimalkan risiko defisiensi atau toksisitas nutrisi. Namun, KB yang optimal dapat bervariasi tergantung pada spesies tanaman, jenis tanah, dan iklim. Beberapa faktor dapat mempengaruhi KB tanah, antara lain:

4.3.1 pH Tanah

pH tanah mempengaruhi kelarutan kation dan kemampuan tanaman untuk menyerapnya. pH tanah yang rendah dapat menyebabkan penurunan kejenuhan basa,

sedangkan pH tanah yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan kejenuhan basa.

4.3.2 Kapasitas Tukar Kation (KTK/ CEC)

KTK tanah adalah kemampuannya dalam menahan kation. Tanah dengan KTK yang tinggi akan memiliki KB yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah yang memiliki KTK rendah.

4.3.2 Kandungan Bahan Organik

Bahan organik mengandung konsentrasi ion tinggi bermuatan negatif (anion), yang dapat menarik dan menahan kation. Tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi akan memiliki KB yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah dengan kandungan bahan organik yang rendah.

4.3.2 Pemupukan

Pemberian pupuk dapat meningkatkan KB dalam tanah. Pupuk biasanya mengandung konsentrasi kation yang tinggi, yang dapat diserap oleh situs pertukaran tanah.

Selain faktor-faktor yang mempengaruhi KB dalam tanah, ada beberapa hal yang menjadi penyebab KB menjadi rendah. KB yang rendah dapat mengakibatkan dampak negatif bagi tanaman, termasuk:

- a. Defisiensi nutrisi, KB yang rendah dapat menyebabkan defisiensi nutrisi pada tanaman, karena nutrisi esensial tidak tersedia dalam jumlah yang cukup.
- b. Penurunan hasil, Defisiensi nutrisi dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman yang terhambat dan hasil panen yang menurun.

- c. Rentan terhadap hama dan penyakit, Tanaman dengan KB yang rendah lebih rentan terhadap serangan hama dan penyakit.
- d. Struktur tanah yang buruk, KB yang rendah dapat menyebabkan struktur tanah yang buruk, karena kation tidak dapat menyatukan partikel-partikel tanah.

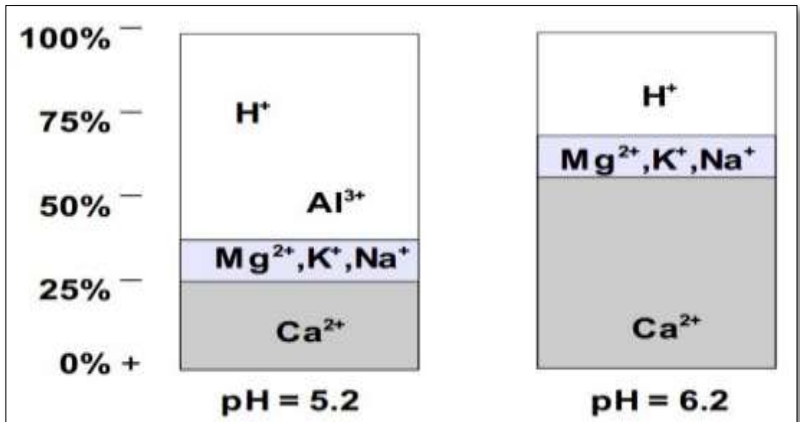
Oleh karena itu, KB dalam tanah dapat ditingkatkan dengan cara:

- 1. Pengapuran, Pengapuran adalah pemberian kapur pertanian ke dalam tanah. Kapur meningkatkan pH tanah, sehingga membuat kation lebih larut dan tersedia bagi tanaman.
- 2. Pemupukan, Pemupukan dapat meningkatkan KB dalam tanah dengan menambahkan kation. Pupuk biasanya mengandung konsentrasi kation yang tinggi, seperti kalsium, magnesium, kalium, dan natrium.
- 3. Penanaman tanaman penutup, Tanaman penutup dapat meningkatkan KB dalam tanah dengan menambahkan bahan organik. Bahan organik mengandung konsentrasi anion yang tinggi, yang dapat menarik dan menahan kation.

4.4 Pengukuran dan Analisis Kejenuhan Basa

Kation yang dapat ditukar dibagi menjadi kation basa dan kation asam. Kation basa adalah kation yang bersifat non-asam sehingga dapat meningkatkan pH tanah seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ dan Na^+ . Kation asam adalah kation yang dapat meningkatkan keasaman tanah dan karenanya menurunkan pH seperti H^+ dan Al^{3+} . Untuk menjaga netralitas elektron maka setiap tempat pengikatan KTK/CEC, harus memiliki kation yang terikat padanya. pH tanah akan dipengaruhi oleh kation mana yang mendominasi situs pertukaran kation.

Semakin banyak kation basa yang ada maka semakin basa tanahnya (pH pun semakin tinggi), sedangkan semakin banyak kation asam maka semakin asam tanahnya (pH semakin rendah). Fenomena pembentukan kejenuhan basa dapat dilihat pada Gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4. 3 Proses Pembentukan Kation Asam dan Kation Basa Yang Mempengaruhi Nilai pH

(sumber: https://www.hill-labs.co.nz/media/5khkbthi/3188v7_technical-note-cation-exchange-capacity-and-base-saturation.pdf)

Kejenuhan basa total adalah fraksi situs pengikatan negatif yang ditempati oleh basa. Sebagai contoh, tingkat KB sebesar 75% berarti 3 dari setiap 4 situs ditempati oleh kation basa. Sisa 25% harus ditempati oleh kation asam. KB total secara sederhana dapat dihitung dengan menjumlahkan kadar Ca, Mg, K, dan Na yang terdapat di dalam tanah; kemudian menyatakan jumlah ini sebagai persentase dari nilai KTK/ECE.

$$\text{Kejenuhan Basa Total} = \frac{[\text{Ca}] + [\text{Mg}] + [\text{K}] + [\text{Na}]}{\text{KTK}}$$

Selain persamaan ini, Tingkat KB juga dapat digunakan untuk mengukur keseimbangan kation di dalam tanah. Untuk tanah yang pH nya berada pada kisaran 5,8-6,5; Tingkat KB dianggap ideal dan dapat digambarkan sebagai berikut:

Kalium	2% - 5%
Kalsium	50% - 75%
Magnesium	5% - 15%
Natrium	1% - 2%

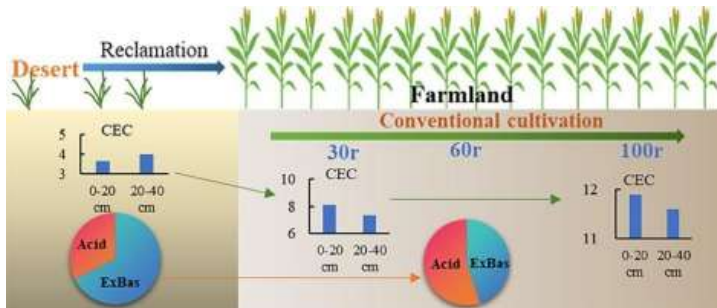
Namun, seperti halnya semua interpretasi uji tanah, upaya untuk mencapai Tingkat yang ideal mungkin tidak ekonomis atau tidak praktis mengingat rentang yang cukup luas yang dijelaskan. Untuk tanaman yang berbeda, pada jenis tanah yang berbeda, tingkat ideal ini mungkin berbeda. Sebagai contoh, 30% - 50% Ca pada tanah gambut lebih tepat dibandingkan kisaran 50% -75%.

4.4 Studi Kasus dan Aplikasi Kejenuhan Basa

Beberapa penelitian yang berbicara tentang KB dapat dijabarkan sebagai berikut:

Long-Term effect of conventional cultivation on soil cation exchange capacity and base saturation in an arid desert region (2024) oleh Ma, D. dkk. Penelitian ini membahas tentang dampak jangka panjang dari budidaya konvensional terhadap KTK dan KB di daerah lahan kering. KTK dan KB tanah berperan penting dalam penilaian kesuburan tanah dan kapasitas penyangga yang belum diteliti dengan jelas di daerah gurun yang masuk dalam kategori lahan kering. Tujuan penelitian ini adalah menyelidiki nilai KTK dan kandungan molekul basa yang dapat ditukar, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi KTK dan KB. Hasil penelitian menunjukkan nilai KTK meningkat sedangkan KB menurun. Faktor yang mempengaruhinya adalah komposisi ukuran partikel tanah, nitrogen total, bahan organik tanah, dan kadar air tanah. Dengan demikian budidaya konvensional di daerah gurun kering dapat meningkatkan KTK tanah sedangkan KB menurun sehingga umur budidaya juga

semakin pendek. Gambaran penelitian ini terlihat pada Gambar 4.4 di bawah ini.



Gambar 4. 4 Model Budidaya Konvensional di Daerah Gurun yang Menunjukkan Hasil Analisis Ktk Dan Kb Nya (Ma, D. Dkk, 2024)

Karakteristik sifat kimia tanah dan status kesuburan tanah pada agroforestri tanaman sayuran berbasis *Eucalyptus* Sp. (2019) oleh Gunawan dkk. Penelitian ini menjelaskan tentang penerapan agroforestri antara tanaman sayuran diantara tanaman *Eucalyptus* Sp. Tanaman yang cocok untuk membentuk agroforestri dengan *Eucalyptus* adalah wortel, kubis, bawang daun, tomat, cabai, dan kentang. Selain tanaman sayuran, tanaman kopi (umur Panjang) dapat juga hidup berdampingan dengan *Eucalyptus* Sp. karena *Eucalyptus* Sp. merupakan tanaman yang mengalami pertumbuhan dengan cepat, kemampuan adaptasi tinggi, dan produktivitasnya juga tinggi. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis sifat kesuburan kimia tanah dan perubahan tanah setelah panen dari beberapa kelas umur tanaman menggunakan agroforestri sayuran berbasis *Eucalyptus* Sp. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model plot yang digunakan adalah plot monokultur dengan nilai sifat fisik tanah KTK mencapai 31,21me/mol (sebelum) dan 25,84 me/mol (sesudah) yang masuk dalam kategori tinggi. Hal yang sama juga terjadi pada nilai KB mencapai 78,82% (sebelum) dan 72,02% (setelah) termasuk dalam kategori sangat tinggi.

Artinya penerapan plot monokultur dengan sistem agroforestri berhasil dengan memberikan nilai KTK dan KB yang baik. Model agroforestri yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4. 5 Penerapan Plot Monokultur Tanaman Sayuran Berbasis Agroforestri *Eucalyptus* Sp. (Gunawan Dkk, 2019)

DAFTAR PUSTAKA

- Gunawan, Wijayanto, N., Sri Wilarso Budi R. 2019. Karakteristik sifat kimia tanah dan status kesuburan tanah pada agroforestri tanaman sayuran berbasis *Eucalyptus* Sp. *Jurnal Sivikultur Tropika*, 10(2): 63-69.
<https://core.ac.uk/download/pdf/294854801.pdf>
- Ma, D., He, Z., Zhao, W., Li, R., Sun, W., Wang, W., Lin, P., Wei, L., Ju, W. 2024. Long-Term effect of conventional cultivation on soil cation exchange capacity and base saturation in an arid desert region. *Science and The Total Environment*, Vol. 949.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724052252>.

BAB 5

UNSUR – UNSUR HARA ESENSIAL TANAH

Oleh Nani Kitti Sihalo

5.1 Pendahuluan

5.1.1 Definisi dan Kriteria Esensialitas Unsur Hara bagi Tanaman

Unsur hara esensial merupakan unsur kimia yang penting untuk menunjang pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Barker & Pilbeam, 2007). Hingga saat ini dikenal 18 unsur hara esensial untuk tanaman terdiri atas unsur C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, B, Zn, Cu, Cl, Co, Mo, dan Ni (Brady dan Weil, 2002).

Berdasarkan fungsi, kuantitas dan kebutuhannya, unsur hara esensial dikelompokkan menjadi : (1) unsur hara makro (dibutuhkan $>0,1\%$ dari berat kering tanaman) yaitu C, H, O, N, P, K, Ca, Mg dan S (Brady dan Weil, 2002) dan (2) Unsur hara mikro yang dibutuhkan $<0,1\%$ berat kering tanaman, yaitu Fe, Cl, Mn, B, Cu, Zn dan Mo (Marschner, 1995) terdapat pada Tabel 5.1.

Gambar 5. 1 Beberapa Unsur Hara Esensial dan Peranannya dalam Tanaman

No	Unsur Hara	Bentuk Kimia dalam tanah	Peranan dalam pertumbuhan tanaman
1	Karbon (C)	CO_2	Penyusun karbohidrat, protein, lemak, asam nukleat, dan senyawa organik.
2	Hidrogen (H)	H_2O	Penyusun karbohidrat, protein, lemak, asam nukleat dan senyawa organik.
3	Oksigen (O)	$\text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$	Penyusun karbohidrat, protein, lemak, asam nukleat dan senyawa organik.
4	Nitrogen (N)	$\text{NO}_3^-, \text{NH}_4^+$	Penyusun protein dan asam amino
5	Fosfor (P)	$\text{H}_2\text{PO}_4^-, \text{HPO}_4^{2-}$	Penyusun asam nukleat, ATP, ADP
6	Kalium (K)	K^+	Sebagai katalis dalam transport ion, pembentuk enzim
7	Kalsium (Ca)	Ca^{2+}	Sebagai komponen dinding sel
8	Magnesium (Mg)	Mg^{2+}	Bagian dari klorofil
9	Sulfur (S)	SO_4^{2-}	Pembentuk asam amino, protein
10	Besi (Fe)	Fe^{2+}	Berperan dalam sintesis klorofil, reaksi oksidasi-reduksi dan fiksasi N
11	Tembaga (Cu)	Cu^{2+}	Aktivator enzim, fotosintesis, metabolisme karbohidrat dan protein dan fiksasi N.
12	Mangan (Mn)	Mn^{2+}	Aktivator enzim, fotosintesis, metabolisme dan asimilasi N
13	Seng (Zn)	Zn^{2+}	Aktivator enzim dan

N o	Unsur Hara	Bentuk Kimia dalam tanah	Peranan dalam pertumbuhan tanaman
			activator pematangan sel
14	Tembaga (Cu)	Cu^{2+}	Komponen enzim, fotosintesis, metabolisme karbohidrat dan protein dan fiksasi N
15	Mangan (Mn)	Mn^{2+}	Aktivator enzim, fotosintesis, metabolisme dan asimilasi N
16	Seng (Zn)	Zn^{2+}	Aktivator enzim, dan activator pematangan sel
17	Boron (B)	HBO_3	Komponen dinding sel
18	Klor (Cl)	Cl^-	Berperan dalam reaksi fotosintesis

Sumber : Marschner (1995), Brady and Weil (2002).

5.1.2 Kriteria Esensialitas Unsur Hara

Suatu elemen dapat dikatakan sebagai hara essential jika memenuhi kriteria berikut Nurhayati (2021) :

1. Jika tanaman kekurangan suatu hara, tanaman tersebut tidak dapat menyelesaikan seluruh siklus hidupnya.
2. Defisiensi dari unsur hara tersebut sangat spesifik dan tidak digantikan oleh unsur hara lain.
3. Elemen tersebut terlibat secara langsung dalam nutrisi tanaman, sebagai contoh terlibat langsung dalam proses metabolisme dan sangat esensial, dan atau juga terlibat dan dibutuhkan untuk proses enzimatik.

5.2 Makronutrien Esensial

a. Nitrogen (N)

Nitrogen adalah salah satu unsur hara makro yang sangat penting dan dibutuhkan tanaman dalam

jumlah yang banyak dan diserap tanaman dalam bentuk ion NH_4^+ (amonium) dan ion NO_3^- (nitrat). Jumlah nitrogen yang terdapat di dalam tanah sedikit sedangkan yang diangkut tanaman dalam bentuk panen setiap musim cukup banyak.

Sumber utama nitrogen di dalam tanah berasal dari berbagai sumber yaitu (1) Nitrogen bebas di atmosfer (2) Hasil dekomposisi bahan organik (3) Loncatan listrik di udara (petir) (4) Pupuk buatan dan pupuk organik

b. Fosfor (P)

Unsur hara fosfor adalah hara makro, dibutuhkan dalam jumlah yang banyak dan esensial bagi pertumbuhan tanaman. Permasalahan yang penting yang harus diketahui dari fosfor ini adalah, sebagian fosfor di dalam tanah umumnya tidak tersedia untuk tanaman, meskipun jumlah totalnya lebih besar dari pada nitrogen. Dalam hal ini ketersediaan fosfor di dalam tanah sangat bergantung kepada sifat dan ciri tanah itu sendiri, serta bagaimana pengelolaan tanah itu oleh manusia.

Sumber utama fosfat anorganik di dalam tanah adalah hasil pelapukan dari mineral-mineral apatit, dari pupuk-pupuk buatan dan dekomposisi bahan organik. Sebagian besar fosfat anorganik tanah berada dalam persenyawaan kalsium, aluminium dan besi fosfat yang kesemuanya sukar larut di dalam air.

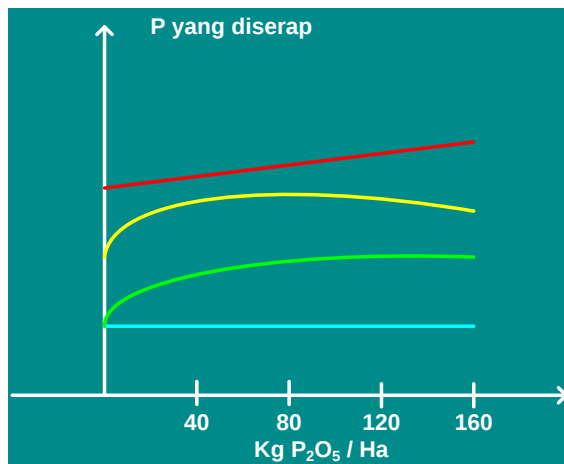
Pengetahuan tentang fosfat organik sangat sedikit, meskipun fraksi fosfat organik ini melebihi setengah dari seluruh fosfat yang ada di dalam tanah. Hal ini karena penelitian-penelitian mengenai fosfat

ini sangat sedikit, dan bentuknya yang kompleks. Meskipun demikian dari data yang diperoleh, ternyata ada tiga grup senyawa fosfat organik tanah yaitu : (1) fitin dan turunannya (2) Asam nukleat dan (3) Fosfolipida.

Kadar fosfor organik tanah dijumpai lebih besar pada lapisan tanah atas (*top soil*) dibandingkan dengan lapisan tanah bawah (*sub soil*). Hal ini terjadi karena pada lapisan tanah atas terdapat penumpukan sisa – sisa tanaman atau bahan organik, sedangkan pada lapisan bawah bahan organik sedikit, dan ditambah lagi dengan adanya serapan hara oleh akar tanaman sampai ke lapisan bawah.

Pada umumnya fosfor di dalam tanah kebanyakan terdapat dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman. Tanaman menyerap hara fosfor dalam bentuk ion orthofosfat yakni : H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} dan PO_4^{3-} . Dimana jumlah dari masing-masing bentuk sangat tergantung pada pH tanah. Pada tanah-tanah yang bereaksi masam lebih banyak dijumpai bentuk H_2PO_4^- dan pada tanah alkalis adalah bentuk PO_4^{3-} .

kemampuan tanah dalam menyerap hara, khususnya fosfor (P). Pada penelitian terhadap 102 jenis tanah mengungkapkan adanya empat pola penyerapan P yang berbeda pada Gambar 5.1, yang masing-masing mencerminkan respons tanah terhadap jumlah pupuk yang diberikan. Secara garis besar, pola-pola tersebut menunjukkan bahwa penyerapan P tidak selalu berbanding lurus dengan jumlah pupuk yang diaplikasikan, melainkan dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia tanah.



Gambar 5. 2 Pola Penyerapan Hara P Oleh 102 Jenis Tanah

Ada 4 pola penyerapan Hara P oleh 102 jenis tanah tersebut, yaitu:

- Pola 1 : Jenis-jenis tanah dimana P yang diserap sebanding dengan pupuk P yang diberikan bentuk kurva adalah linier.
- Pola 2 : Jenis-jenis tanah, dimana makin tinggi pemberian pupuk, makin menurun penyerapan hara. Bentuk kurva adalah kuadratik.
- Pola 3 : Bila pupuk yang diberikan dibawah 40 kg P_2O_5 / Ha, laju penyerapan tinggi. Diatas 40 kg P_2O_5 / Ha bentuk kurva jadi LINIER dengan laju lebih rendah. Hal ini terjadi karena pemberian pupuk P sampai dengan 40 kg P_2O_5 / Ha, penyerapan P terutama untuk pertumbuhan akar, sehingga penyerapan makin besar.
- Pola 4 : Penambahan pupuk sampai 160 kg P_2O_5 / Ha ternyata tidak ada peningkatan

penyerapan. Bentuk kurva adalah linier datar. Jenis tanah ini fiksasi P-nya sangat tinggi.

Disimpulkan bahwa, jumlah Hara Pupuk yang diserap *tidak selalu berbanding lurus* dengan hara yang diserap, dan jumlah pupuk yang diberikan dapat mempengaruhi ketersediaan hara tanah.

Ada 2 kemungkinan, yaitu :

- (1) Makin banyak pemberian Pupuk P, makin banyak P tanah tersedia. Hal ini disebabkan oleh:
 - a) Pupuk P merangsang pertumbuhan akar, hingga kemampuan akar untuk menyerap pupuk P lebih besar.
 - b) Pupuk P merangsang kegiatan mikroba pelapukan bahan organik tanah, sehingga lebih banyak P organik yang tersedia.
 - c) Pupuk P meningkatkan nisbah (ratio) PUCUK/AKAR
- (2) Penambahan Pupuk P mengakibatkan penyerapan P tanah menurun. Hal ini disebabkan karena penambahan P mengakibatkan IMOBILISASI P dalam tanah. (Gambar 5.1)

c. Kalium (K)

Kalium adalah unsur hara makro ketiga yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang banyak setelah nitrogen dan fosfor, bahkan kadang-kadang melebihi jumlah nitrogen, seperti halnya kebutuhan kalium pada tanaman yang menghasilkan umbi-umbian.

Kalium dapat bertambah ke dalam tanah melalui berbagai sumber : (1) sisa tanaman, hewan dan pupuk kandang (2) pupuk perdagangan dan (3) Pelapukan mineral kalium.

Kehilangan kalium dari tanah dapat terjadi dengan beberapa cara seperti : (1). Terangkut tanaman bersama panen (2). Tercuci (3). Tererosi(4). Terfiksasi.

d. Sulfur (S)

Unsur hara sulfur juga unsur hara esensial, merupakan unsur hara makro sekunder seperti halnya kalsium dan magnesium. Sumber alami belerang yang menyediakan belerang ke dalam tanah berasal dari tiga sumber adalah (1) Mineral tanah (2) Gas-gas belerang.

Ada tiga bentuk senyawa belerang di dalam tanah yaitu Belerang organik, Belerang sulfat, Belerang elemen dan sulfide. Dari bentuk-bentuk tersebut tidak semua langsung dapat diserap tanaman karena tanaman hanya menyerap belerang dalam bentuk ion SO_4^{2-} . Di dalam tanah bentuk-bentuk senyawa belerang tersebut mengalami beberapa perubahan yang sangat menentukan ketersediaannya bagi tanaman.

e. Kalsium (Ca) dan Magnesium (Mg)

Kalsium dan magnesium adalah unsur hara makro sekunder yang juga dibutuhkan tanaman dalam jumlah banyak. Kedua unsur ini sering diaplikasikan ke dalam tanah dalam bentuk kapur, terutama pada tanah yang bereaksi masam untuk menaikkan pH tanah.

Sumber utama kalsium di dalam tanah adalah kerak bumi yang mengandung 3,6% kalsium, dari bahan kapur dan pupuk-pupuk buatan. Mineral-mineral utama yang banyak mengandung kalsium adalah kalsit (CaCO_3) dan dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ yang banyak sebagai penyusun batuan sedimen.

Kadar kalsium dan magnesium di dalam tanah sangat bervariasi pada tanah-tanah di daerah humus mengandung kalsium sekitar 1%-2% dan magnesium sekitar 1%. Pada tanah salin di daerah arid dan semi arid mengandung lebih dari 5% dan beberapa persen magnesium.

5.3 Mikronutrien Esensial

a. Besi (Fe)

Sumber Besi di Dalam Tanah : Bagian terbesar dari besi tanah dijumpai pada kisi-kisi kristal mineral yang mengandung besi. Bentuk dan kelarutan besi dalam tanah. Pelapukan Fe-silikat atau Fe-oksida akan menghasilkan kation-kation Fe^{2+} yang reaktif melalui reaksi: $\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + 4\text{OH}^-$.

Selama lingkungannya tidak mengoksidasi maka kation Fe^{2+} akan mantap. Namun larutan pelapukan umumnya mengandung sejumlah oksigen sehingga kation besi akan terendapkan sebagai oksida feri terhidrat. $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 8\text{H}^+$

Pada lingkungan kaya sulfida, kation Fe^{2+} segera terendapkan sebagai sulfida pada pH >7,0 membentuk FeS . Unsur diperoleh dari perombakan bahan organik yang menghasilkan H_2S kemudian

bereaksi dengan oksigen. $2\text{FeS} + 2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

b. Mangan (Mn)

Bentuk dan Keberadaan Mangan Dalam Tanah. Ketersediaan dan kelarutan mangan tinggi pada tanah masam. Kelarutan Mn^{2+} mengalami penurunan sebesar seratus kali tiap kenaikan satu unit pH. Pada suasana anaerob bakteri *Bacillus pycocyaneus* mereduksi Mn_2O_3 dan MnO_2 menjadi kation Mn^{2+}

Kandungan bahan organik yang tinggi menyebabkan peningkatan Mn^{2+} dalam bentuk Mn-khelat → Sehingga mengurangi ketersediaan mangan. Pemanasan tanah meningkatkan kelarutan mangan karena berkurangnya bahan organik yang menyerap mangan.

c. Mangan (Mn)

Mangan berfungsi sebagai bagian dari sistem enzim di dalam tanaman. Selain itu berfungsi sebagai aktivator untuk beberapa reaksi metabolik penting lainnya dan memainkan peranan secara langsung dalam fotosintesis dalam hubungannya terhadap pembentukan klorofil. Mangan tidak dapat ditranslokasikan di dalam tanaman, maka gejala kekurangan Mn terjadi pada bagian pusat pertumbuhan, seperti : Bagian atas atau bagian muda tanaman yang ditunjukkan oleh klorosis antara kerangka daun (vein) dan kadang-kadang nampak bintik berwarna hitam kecoklatan.

Defisiensi Mangan dapat diperbaiki dengan beberapa cara: Jika pengapuran atau kapur penyebab defisiensi maka dapat dikoreksi dengan penurunan pH tanah hingga mencapai di bawah 6,5.

Hal ini dapat dilakukan dengan pengurangan dosis kapur atau penambahan bahan yang menghasilkan kemasaman tanah, seperti penggunaan bahan S. Aplikasi menurunkan pH dan mengubah Mn dalam bentuk tersedia bagi tanaman.

d. Seng (Zn)

Tanaman menyerap hara seng (Zn) dalam bentuk Zn^{2+} dari larutan sekitar dengan melibatkan proses non metabolis, yang pada hakikatnya adalah pertukaran kation. Pengambilan kation Zn terus meningkat sejalan peningkatan kepekatannya dalam larutan.

Bentuk dan Keberadaan Seng dalam Tanah. Pelapukan pelikan Zn akan melepaskan ion Zn^{2+} ke dalam larutan tanah. Seng dan kation mikro lainnya tersedia paling tinggi pada pH rendah sehingga dapat berbahaya bagi tanaman. Pengapuran yang berlebihan dapat menyebabkan tanaman kekurangan unsur mikro, terutama Zn, Fe, Mn, Cu dan B.

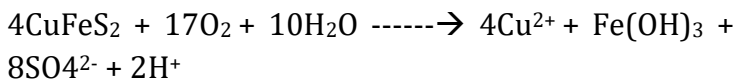
Hal ini disebabkan pengaruh peningkatan nilai pH tanah yang mengakibatkan bentuk kation unsur mikro berubah menjadi hidroksida yang tidak larut dengan contoh reaksi sbb: $Zn^{2+} + 2OH^- \rightarrow Zn(OH)_2$.

e. Tembaga (Cu)

Secara umum konsentrasi tembaga di dalam tanah tergolong rendah. Lebih dari 98% dari tembaga yang terdapat di dalam larutan tanah bersenyawa dengan bahan organik. Bila dibandingkan dengan unsur mikro lainnya, seperti Zn^{2+} dan Mn^{2+} , maka tembaga diikat lebih kuat oleh bahan organik, sehingga tembaga organik ini

berperan penting dalam mengatur mobilitas dan ketersediaan Cu di dalam tanah.

Pada kompleks pertukaran senyawa anorganik dan koloid tanah Cu juga dijerap lebih kuat dari kation-kation lainnya, sehingga bersifat sangat immobil. Akibatnya dalam bentuk kation dapat dipertukarkan, Cu tidak tersedia bagi tanaman. Melalui proses hancuran iklim, penyediaan Cu^{2+} dari mineral-mineral primer melalui proses dekomposisi kimia digambarkan sbb:



f. Khlor (Cl)

Ketersediaan Khlor di dalam tanah : Umumnya khlor di dalam tanah berada dalam bentuk larut seperti NaCl dan KCl. Ion Cl^- ini tidak dijerap oleh koloid loit sehingga mudah tercuci atau bergerak ke permukaan tanah pada tanah-tanah arid. Ketersediaan Cl tanah lebih tinggi pada tanah di daerah arid dan semi arid dari pada daerah humid, bahkan dapat mencapai titik racun, terutama pada tanah salin dengan drainase yang jelek.

g. Molibdenum (Mo)

Ketersediaan Mo dapat meningkat dengan adanya pertukaran ion-ion Mo yang terjepit pada koloid tanah dengan ion OH^- di dalam larutan tanah. Beberapa anion lain dapat juga menukar Mo dengan adanya perubahan energi yang tinggi. Molibdenum dapat juga berasosiasi dengan oksida besi yang banyak dijumpai pada tanah-tanah mineral masam.

h. Boron (B)

Sumber Boron di dalam tanah berasal dari batuan dan mineral. Batuan beku seperti batuan

granit (15 ppm), batuan basalt (5 ppm), dari batuan endapan seperti batu kapur (20 ppm), batu pasir (35 ppm) dan batu liat (100 ppm). Batuan endapan mengandung boron lebih tinggi dibandingkan dengan batuan beku.

5.4 Peran dan Fungsi dalam Tanaman

a. Nitrogen (N)

Salah satu faktor penting peranan nitrogen adalah pengaruhnya terhadap penggunaan karbohidrat di dalam tanaman. Bila nitrogen ditambahkan dalam jumlah yang banyak maka akan menurunkan level karbohidrat di dalam tanaman akan meningkat. Dengan demikian penggunaan nitrogen berpengaruh langsung terhadap sintesis karbohidrat di dalam sel tanaman dan selanjutnya akan berpengaruh terhadap vigor tanaman. Pengaruh nitrogen meningkatkan bagian protoplasma menimbulkan beberapa akibat antara lain terjadi peningkatan ukuran sel, menyebabkan daun dan batang tanaman menjadi lebih sukulen dan kurang keras, juga meningkatkan bagian air sebagai akibat meningkatnya kandungan air protoplasma dan mengurangi bagian kalsium.

Nitrogen juga berperan sebagai penyusun klorofil yang menyebabkan daun berwarna hijau. Kandungan nitrogen yang menyebabkan daun berwarna hijau.

b. Fosfor (P)

Metabolisme tanaman fosfor memegang peranan langsung sebagai pembawa energi. Fungsi ini dimungkinkan karena adanya beberapa ikatan yang

melalui proses hidrolisis dapat menghasilkan energi. Senyawa fosfor yang mempunyai energi tinggi dan mempunyai potensi menyimpan dan melepaskan energi untuk proses-proses metabolisme di dalam tanaman disebut Adenosin Tri Fosfat (ATP).

Di dalam proses oksidasi terjadi pembebasan energi, dimana molekul ADP yang kemudian menjadi ATP. Secara fisik ATP memegang peranan dalam hal menghasilkan panas, cahaya dan gerak, secara kimia peranannya dapat dilihat dalam proses fotosintesis dan respirasi.

Fosfor juga berperan dalam menstimulir pertumbuhan akar. Hal ini dibuktikan dari hasil percobaan pada tanah yang kekurangan fosfor, bila ditambahkan fosfor, ternyata bahagian akar lebih besar pertambahannya dibandingkan dengan bagian atas tanaman terutama daun.

c. Kalium (K)

Kalium berperan meningkatkan resistensi terhadap penyakit tertentu, dan meningkatkan pertumbuhan perakaran. Kalium cenderung menghalangi kerebahan tanaman dan melawan efek buruk akibat pemberian nitrogen yang berlebihan, dan berpengaruh mencegah kematangan yang dipercepat oleh hara fosfor.

Kalium berfungsi menjaga keseimbangan, baik pada nitrogen maupun pada fosfor. Kalium sangat dibutuhkan untuk pembentukan pati dan translokasi hasil-hasil fotosintesis seperti gula. Meskipun kalium bukan sebagai penyusun klorofil. Pada tanaman padi-padian unsur ini berperan dalam pembentukan bulir dan pada tanaman umbi-umbian untuk pembentukan umbi.

d. Magnesium (Mg)

Peranan umum dari magnesium dalam tubuh tanaman adalah sebagai berikut:

- (1) Sebagai bagian esensial dari klorofil yang memberikan warna hijau pada daun
- (2) Diperlukan dalam pembentukan gula dari karbondioksida dan air (fotosintesis).
- (3) Mengatur penyerapan unsur hara lainnya
- (4) Bertindak sebagai pembawa fosfor di dalam tubuh tanaman
- (5) Menstimulasi pertumbuhan minyak dan lemak.
- (6) Dan berperan dalam translokasi pati di dalam tubuh tanaman

e. Besi (Fe)

Peranan Besi dalam Tanaman : Besi merupakan katalis pembentukan klorofil dan berfungsi sebagai pembawa oksigen. Selain itu juga membantu pembentukan sistem enzim pernafasan. Defisiensi Fe pada tanaman menyebabkan klorosis pada jaringan daun (daun berwarna hijau pucat karena ketidakcukupan sintesis klorofil). Unsur besi di dalam tanaman tidak mobil sehingga tidak bisa ditranslokasikan di dalam tanaman. Gejala defisiensi terlihat pada bagian tanaman yang muda dan atas tanaman.

f. Seng (Zn)

Peranan Seng dalam Tanaman. Seng berfungsi dalam sintesis senyawa pertumbuhan tanaman dan sistem enzim serta esensial untuk meningkatkan reaksi metabolik tertentu. Seng sangat diperlukan untuk memproduksi klorofil dan karbohidrat. Seng tidak ditranslokasikan pada tanaman, sehingga

defisiensi pertama nampak pada daun muda dan bagian-bagian tanaman yang muda.

Defisiensi Zn dalam jagung disebut “white bud” sebab bud (bagian-bagian) muda tanaman berubah menjadi putih atau kuning muda pada awal pertumbuhan. Perkembangan klorosis bisa dimulai dari tepi balik dari kedua sisinya hingga menyebar ke tengah. Gejala lain karena kekurangan Zn adalah berwarna coklat pada tanaman padi, roset dan daun kecil pada tanaman buah-buahan. Apabila kekurangan terus (berat) dapat menjadikan tanaman jagung dan buncis pendek.

g. Tembaga (Cu)

Tembaga merupakan penyusun plastosianin protein di dalam kloroplas yang membentuk rantai transportasi elektron dan menghubungkan dua sistem fotosintesis secara fotokimia. Tembaga berperan dalam sintesis atau stabilitas klorofil dari pigmen tanaman. Tembaga merupakan bagian penting enzim asam askorbik oksidase, laktase dan tirosinase.

Selain berperan dalam reaksi enzimatik, Cu juga berfungsi dalam proses metabolisme lain, misalnya dalam metabolisme protein dan karbohidrat. Sintesis protein pada tanaman yang kekurangan Cu akan terganggu dan akan terbentuk senyawa N-amino yang mudah larut. Hal ini dapat dijelaskan oleh adanya peranan Cu sebagai kofaktor dalam sintesis DNA dan RNA.

Secara umum gejala kahat Cu pada tanaman terjadi pada kadar kurang dari 6 ppm. Pada tanaman biji-bijian misalnya gandum gejala kahat Cu dimulai dari ujung daun muda yang menjadi putih atau

kepuatan, mengecil dan menggulung yang diikuti oleh pertumbuhan internodus yang terhambat. Selanjutnya juga mempengaruhi proses pembungaan dan pembentukan buah pada fase generatif, serta perkembangan jaringan muda karena rendahnya mobilitas Cu dalam tanaman.

h. Klor (Cl)

Peranan Klor dalam Tanaman : Di dalam tubuh tanaman klor berperan penting dalam proses fotosintesis. Peranan Cl terutama menaikkan tekanan osmotik sel dan menghasilkan hidrofilik akibat penambahan ion pada hidrasi jaringan tanaman.

Tanaman berbeda-beda kepekaannya terhadap klor. Peranan Cl dalam perharaan kelapa sawit mempunyai arti penting. Respons pertumbuhan terhadap penambahan Cl dapat dilihat pada tanaman kelapa sawit pada tanaman kelapa dan kelapa sawit.

Gejala kekurangan Cl tergantung pada tanamannya. Kekurangan unsur ini ditunjukkan dengan gejala klorosis pada daun-daun muda dan kelayuan tanaman yang menyeluruh. Pengaruh kelebihan Cl di dalam tanah. Pertumbuhan tanaman pada tanah yang dipengaruhi oleh kandungan garam sering terlihat pada gejala keracunan Cl.

Keracunan Cl pada tanaman mengakibatkan terbakarnya ujung-ujung daun dan tepi daun, daun berwarna merah ketuan, kuning muda dan bercak-bercak pada daun.

i. Molibdenum (Mo)

Peranan Molibdenum dalam Tanaman : Di dalam tubuh tanaman Molibdenum berperan

sebagai komponen enzim-enzim nitrat reduktase, nitrogenase dan sulfit oksidase. Fungsi utama Mo dalam tanaman terangkum dalam sistem transfer-elektron. Sebagai contoh : Nitrat reduktase memerlukan Mo untuk mereduksi NO_3^- dan nitrogenase memerlukan Mo untuk mereduksi NO_3^- dan nitrogenase memerlukan Mo untuk menambat N_2 .

j. Boron (B)

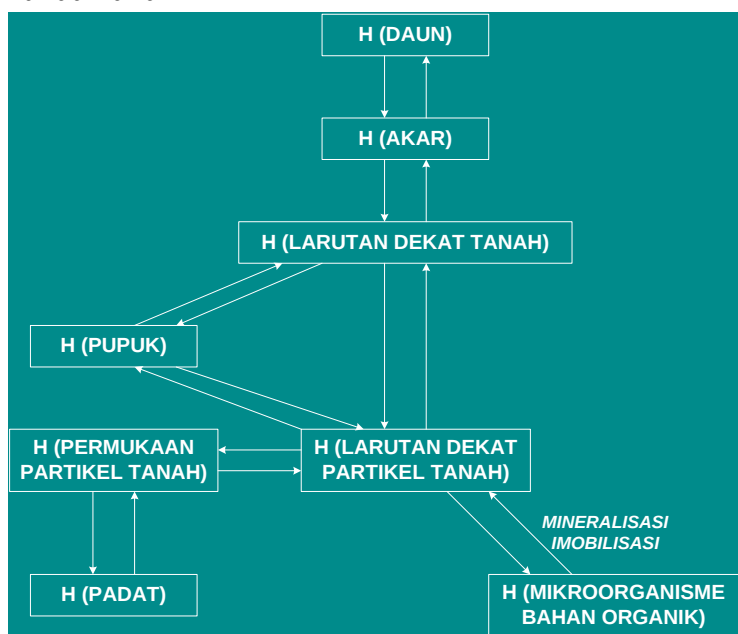
Peranan Boron dalam Tanaman: Dalam proses fisiologis tanaman. Boron mempunyai peranan dalam proses metabolisme tanaman terutama dalam transfer gula. Hal ini diketahui karena asam borat yang bergabung dengan polihidroksil, alkohol dan gula. Komplek gula borat dapat dengan mudah melalui membran sel daripada bila gula itu sendiri.

Gula dapat berpindah ke sel sebelumnya melalui satu membran karena gula borat dapat bereaksi balik. Dengan demikian translokasi akan lancar bila B cukup tersedia sebaliknya bila terjadi kahat B translokasi gula akan terhambat.

Gangguan yang timbul pada metabolisme karbohidrat, merupakan keistimewaan dari kahat B yang terjadi pada tanaman, dimana asimilasi yang terjadi pada daun sedikit sekali. Pada tanaman kahat B, dilaporkan terjadi akumulasi auksin, akibatnya pertumbuhan awal tanaman terganggu. D dilaporkan juga, bahwa B melindungi sistem oksidasi IAA yang sangat kompleks dengan inhibitor dari oksidasi IAA, suatu kemungkinan hubungan antara kahat B dan metabolisme auksin.

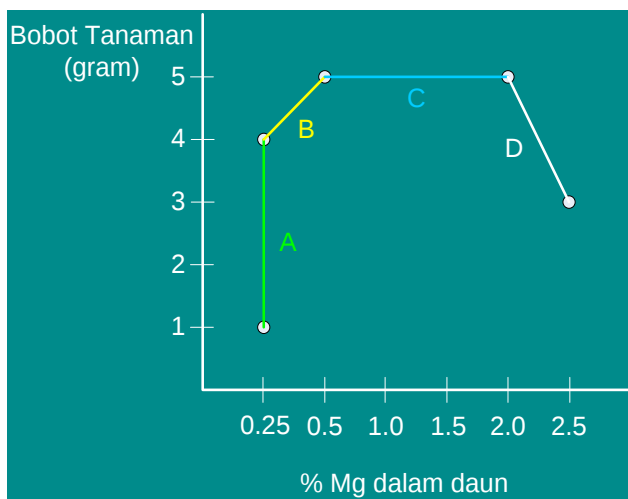
5.5 Interaksi Antar Unsur Hara

Ketersediaan hara berasal dari bahan padat yaitu zat hara mikro seperti Fe, Zn, Mn dsb berasal dari mineral, ada yang dalam keadaan larut, dalam keadaan diadsorpsi oleh permukaan liat (dapat ditukar), dalam keadaan terikat oleh bahan organik, merupakan bagian dari mineral yang tidak larut. Jumlah hara pada tiap fase dan kecepatan gerakan dari satu ke fase lain ditentukan oleh kapasitas sumber hara dan intensitas larutan hara. Kapasitas sumber hara yang mensuplai hara dalam larutan, jumlahnya dapat diukur dengan pengenceran dan melalui faktor kinetis. Intensitas hara yang berada dalam larutan tanah, jumlahnya dipengaruhi oleh besarnya faktor kinetis dan faktor difusi kearah permukaan akar.



Gambar 5. 3 Skema Interaksi Hara dengan Tanah dan Tanaman

Pada gambar 5.3 skema interaksi hara dengan tanah dan tanaman. Jumlah hara pada tiap fase yaitu fase larutan tanah yaitu hara tersedia dalam bentuk ion yang dapat diserap oleh akar tanaman. Fase pertukaran hara melekat pada koloid tanah (misalnya lempung dan bahan organik) dan dapat dipertukarkan dengan ion lain dalam larutan tanah. Gerakan hara dari satu fase ke fase lain yaitu difusi perpindahan ion hara dari daerah konsentrasi tinggi ke rendah dalam larutan tanah. Aliran massa yaitu hara bergerak bersama aliran air menuju akibat transpirasi tanaman. Pertukaran ion yaitu ion hara terikat pada partikel tanah dapat berpindah ke larutan tanah melalui pertukaran ion dengan ion lain. Mineralisasi dan Immobilisasi yaitu proses pelepasan hara dari bahan organik oleh mikroba (mineralisasi) atau pengikatan kembali oleh mikroba (imobilisasi).



Gambar 5. 4 Hubungan Antara Penyerapan Hara dari Larutan dengan Pertumbuhan Tanaman

Ket : A = Konsentrasi Minimum ; B=Penyesuaian ; C=Konsumsi Berlebihan;
D = Keracunan

Pada gambar 5.4 menunjukkan hubungan antara kandungan magnesium (Mg) dalam daun dan bobot tanaman (gram). Sumbu X mewakili persentase magnesium (% Mg) dalam daun tanaman. Sumbu Y menunjukkan bobot tanaman dalam gram. Grafik menunjukkan bahwa pada kadar Mg yang sangat rendah (sekitar 0,25%), bobot tanaman juga rendah. Saat kadar Mg meningkat hingga sekitar 0,5%–1,5%, bobot tanaman meningkat secara signifikan dan mencapai titik maksimum sekitar 5 gram. Setelah melewati kadar Mg sekitar 1,5%–2,0%, bobot tanaman mulai menurun meskipun kadar Mg dalam daun terus meningkat.

Kesimpulan dari grafik pada gambar 5.4, bila konsentrasi Mg dinaikkan maka bobot tanaman ikut meningkat tanpa peningkatan kadar Mg dalam daun. Titik ini disebut: *konsentrasi minimum atau konsentrasi "kritis"*. Bila konsentrasi Mg dalam larutan dinaikkan terus, maka peningkatan bobot tanaman mulai berkurang tetapi Mg daun mulai meningkat. Setelah kadar Mg daun mencapai 0.5%, maka peningkatan Mg dalam larutan tidak lagi meningkatkan bobot tanaman walaupun kadar Mg dalam daun meningkat terus hingga mencapai 2%. Bila kadar Mg larutan dinaikkan terus, maka kadar Mg dalam daun akan meningkat hingga diatas 2% tetapi bobot tanaman bahkan menurun. Fase ini telah mencapai fase keracunan.

Dalam fisiologi tanaman, hara (nutrisi) yang diangkut dalam tanaman dapat diklasifikasikan berdasarkan mobilitasnya dalam jaringan floem, yaitu:

✓ **Hara yang tidak mobil dalam floem (*Immobile in Phloem*)**

Hara yang tidak mobil dalam Floem (*Immobile in Phloem*) contoh Kalsium (Ca), Besi (Fe). Hara – hara ini cenderung tidak dapat bergerak bebas dalam jaringan floem. Hara tersebut lebih banyak ditransportasikan

melalui xylem (pembuluh yang mengangkut air dan mineral dari akar ke bagian atas tanaman). Karena keterbatasan mobilitasnya dalam floem, unsur ini lebih banyak tertahan di daun tua dan jarang terdistribusi ke jaringan yang sedang berkembang seperti tunas atau daun muda. Oleh karena itu, gejala defisiensi (kekurangan unsur hara) dari Ca dan Fe biasanya terlihat lebih jelas pada daun muda atau bagian tanaman yang sedang tumbuh.

Pada gambar 5.4 menunjukkan grafik hubungan antara konsentrasi hara dalam larutan tanah terhadap waktu, dengan penyerapan cepat (garis hijau) dan penyerapan lambat (garis biru). Gambar 2 bagian A. analisis untuk hara yang tidak mobil dalam Floem (Ca, Fe). Kalsium (Ca) dan Fe (Fe) merupakan unsur hara yang tidak mobil dalam floem, yang berarti hara tidak dapat dengan mudah dipindahkan dari jaringan tua ke jaringan baru. Unsur – unsur ini lebih banyak diangkut melalui xylem, yang mengandalkan aliran transpirasi. Oleh karena itu, ketersediaan di sekitar akar sangat penting, karena tanaman tidak dapat mengalokasikan ulang unsur ini dari daun tua ke daun muda.

✓ **Hara yang mobil dalam floem (*Mobile in Phloem*)**

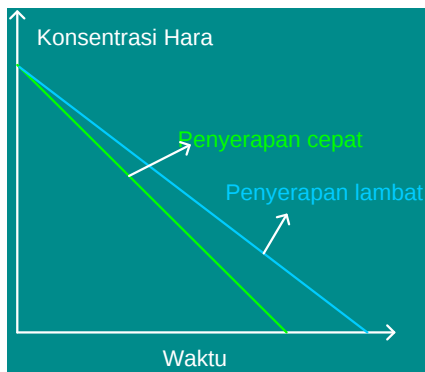
Hara yang mobil dalam floem (*Mobile in Phloem*) contoh Fosfor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg), Nitrogen (N) dsb. Hara-hara ini dapat bergerak secara aktif di dalam floem, memungkinkan transportasi ulang dari daun tua ke daun muda atau organ yang membutuhkan. Ketika tanaman mengalami defisiensi unsur hara ini, tanaman akan mengambilnya dari jaringan tua dan mendistribusikannya ke jaringan muda atau organ pertumbuhan. Oleh karena itu, gejala defisiensi dari unsur hara yang mobil ini lebih sering terlihat di daun tua

terlebih dahulu, karena unsur tersebut ditranslokasikan ke bagian yang lebih muda dan lebih aktif dalam pertumbuhan.

Pada gambar 5.4 menunjukkan grafik hubungan antara konsentrasi hara dalam larutan tanah terhadap waktu, dengan penyerapan cepat (garis hijau) dan penyerapan lambat (garis biru). Gambar 5.4 bagian B menunjukkan grafik perubahan konsentrasi hara dalam larutan tanah terhadap waktu, dengan dua pola penyerapan hara : penyerapan cepat (garis biru) dan penyerapan lambat (garis hijau). Unsur hara yang mobil Gambar 5.4 bagian A dalam floem termasuk Fosfor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg) dan Nitrogen (N).

Unsur – unsur ini dapat bergerak dari jaringan tua ke jaringan muda, sehingga tanaman bisa mengalokasikan ulang cadangannya jika terjadi kekurangan. Karena mobilitasnya yang tinggi dalam floem, unsur ini lebih mudah tersedia bagi tanaman dan sering kali memiliki laju penyerapan yang lebih cepat dibandingkan unsur yang tidak mobil seperti Ca dan Fe.

Implikasi dalam Pertanian dan Pemupukan yaitu hara yang tidak mobil dalam floem (Ca, Fe) harus tersedia secara konstan di zona akar karena tidak bisa dipindahkan ke jaringan baru. Oleh karena itu, pemupukan Ca dan Fe sebaiknya diberikan dalam jumlah yang cukup selama periode pertumbuhan tanaman. Hara yang mobil dalam floem (N, P, K, Mg) dapat diberikan dalam dosis yang lebih fleksibel, karena tanaman dapat menggunakan cadangan dari daun tua jika terjadi kekurangan.



A. Tidak Mobil (Ca, Fe)

B. Mobil (P, K, Mg, N)

Gambar 5.5 Mobilitas Hara di dalam Phloem (A) Tidak Mobil (Ca, Fe) B. Mobil (P, K, Mg, N)

Hubungan antara penyerapan hara dari tanah dengan pertumbuhan tanaman sangat erat, karena hara merupakan factor utama yang mendukung metabolisme dan perkembangan tanaman. Sumber hara bagi tanaman adalah hara tanah (A) yaitu hara yang sudah tersedia secara alami di dalam tanah, baik dalam bentuk mineral yang terurai maupun dari bahan organik yang terdekomposisi. Hara dari pupuk (B) yaitu hara yang ditambahkan ke dalam tanah melalui pemupukan untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara yang mungkin terbatas dalam tanah.

Jumlah hara yang diserap akar tanaman dari hara tanah dan hara pupuk adalah sebanding dengan jumlah yang tersedia di dalam tanah dari kedua sumber hara tersebut :

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b}$$

dimana :

A = jumlah hara tanah

B = jumlah hara pupuk

a = jumlah hara tanah yang diserap akar

b = jumlah hara pupuk yang diserap akar

Pada Tabel 5.1 menunjukkan persentase unsur hara yang diserap oleh tanaman jagung melalui tiga mekanisme utama : intersepsi akar, aliran massa dan difusi. Intersepsi akar adalah proses dimana akar tanaman secara fisik bersentuhan dengan unsur hara di dalam tanah. Unsur hara yang dominan terserap melalui mekanisme ini adalah Kalsium (150%) dan Magnesium (33%), sementara unsur lainnya memiliki kontribusi yang jauh lebih kecil (<1% hingga 5%). Aliran massa ini terjadi ketika unsur hara larut dalam air dan terbawa ke akar melalui pergerakan air tanah akibat transpirasi. Unsur hara yang paling banyak terserap melalui aliran massa adalah Magnesium (600%), Kalsium (375%) dan sulfur (300%). Nitrogen (80%) juga cukup dominan dalam proses ini. Sebaliknya, unsur Fosforus (5%) memiliki kontribusi aliran massa yang sangat rendah. Difusi adalah perpindahan unsur hara dari area dengan konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah di sekitar akar. Unsur yang paling banyak diserap melalui difusi adalah Fosforus (93%), diikuti oleh Kalium (80%). Sementara itu, unsur Nitrogen (19%) juga cukup signifikan dalam mekanisme ini, tetapi unsur Kalsium, Magnesium dan Sulfur tidak mengalami difusi sama sekali (0%).

Pada Tabel 5.1 menunjukkan unsur hara Nitrogen terutama diserap melalui aliran massa (80%) dan sebagian melalui difusi (19%). Fosforus sebagian besar diserap melalui difusi (93%), sementara aliran massa hanya menyumbang 5%. Kalium juga dominan melalui difusi (80%), tetapi aliran massa berkontribusi sebesar 18%. Kalsium dan Magnesium bergantung pada aliran massa (375% dan 600%) serta intersepsi akar (150% dan 33%), tanpa mekanisme difusi. Sulfur hampir seluruhnya diserap melalui aliran massa (300%) dan tidak melalui difusi.

Mekanisme penyerapan unsur hara sangat bervariasi tergantung pada jenis unsur hara tersebut. Unsur yang mobil di dalam tanah, seperti Nitrogen dan Sulfur, lebih banyak diserap melalui aliran massa, sedangkan unsur dengan mobilitas terbatas, seperti Fosforus dan Kalium, lebih bergantung pada difusi.

Tabel 5. 1 Persen Hara Diserap oleh Tanaman Jagung yang Menuju ke Akar Melalui Intersepsi Akar, Aliran Massa, dan Difusi

No	Hara	Intersepsi akar	Aliran massa % serapan	Difusi
1	Nitrogen	< 1	80	19
2	Fosforus	2	5	93
3	Kalium	2	18	80
4	Kalsium	150	375	0
5	Magnesium	33	600	0
6	Sulfur	5	300	0

Sumber : Nurhayati (2021)

5.6 Faktor - Faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Unsur Hara

Jumlah hara pada tiap fase dan kecepatan gerakan dari satu fase ke fase lain ditentukan oleh Kapasitas Sumber Hara dan Intensitas Larutan Hara. Kebutuhan hara minimum bagi tanaman kisarannya (*range*) sangat besar untuk tiap hara hal ini disebabkan oleh Keragaman tanaman, metode pengukuran yang bermacam-macam, keragaman tanah.

Kapasitas sumber hara yang mensuplai hara dalam larutan, jumlahnya dapat diukur dengan pengenceran dan melalui faktor kinetis. Intensitas hara yang berada dalam larutan tanah, jumlahnya dipengaruhi oleh besarnya Faktor

Kinetis dan Faktor Difusi kearah permukaan akar. Faktor intensitas hara dapat memprediksi ketersediaan hara dalam tanah dan banyaknya penyerapan hara.

Secara umum urutan kebutuhan minimum unsur hara bagi tanaman adalah :

$$\text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Cl} > \text{K} > \text{S} > \text{P}$$

5.7 Diagnosa Kekurangan dan Keracunan Unsur Hara

a. Nitrogen (N)

Bila tanaman kahat hara nitrogen, pertumbuhan tanaman akan terhambat, tanaman tampak kurus, kerdil dan daun berwarna kuning pucat. Kahat nitrogen menghambat produksi protein dan bahan-bahan penting lainnya dalam pembentukan sel-sel baru.

Warna pucat pada tanaman yang kekurangan nitrogen berasal dari terhambatnya pembentukan klorofil, selanjutnya pertumbuhan akan berjalan dengan lambat karena klorofil dibutuhkan pada pembentukan karbohidrat pada proses fotosintesis. Warna pucat yang disebabkan kahat nitrogen ini terjadi lebih dulu pada daun-daun tua, sepanjang tulang-tulang daun . Hal ini terjadi karena nitrogen bersifat mobil di dalam tanaman.

b. Sulfur (Belarang)

Kekahatan belarang mempengaruhi sintesis protein, oleh karena berkurangnya sintesis asam-asam amino yang mengandung belarang pada jaringan tanaman dan mempengaruhi sintesis protein, oleh karena berkurangnya sintesis asam-asam amino yang mengandung belarang selain itu, Kekahatan belarang lebih berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman

bagian atas daripada akar. Gejalanya terlihat tanaman menguning, pertumbuhan kerdil, batang kurus, kaku dan mudah rapuh.

c. Seng (Zn)

Defisiensi Zn dalam jagung disebut “white bud” sebab bud (bagian-bagian) muda tanaman berubah menjadi putih atau kuning muda pada awal pertumbuhan. Perkembangan klorosis bisa dimulai dari tepi balik dari kedua sisinya hingga menyebar ke tengah.

Gejala lain karena kekurangan Zn adalah berwarna coklat pada tanaman padi, roset dan daun kecil pada tanaman buah-buahan. Apabila kekurangan terus (berat) dapat menjadikan tanaman jagung dan buncis pendek.

d. Tembaga (Cu)

Secara umum gejala kahat Cu pada tanaman terjadi pada kadar kurang dari 6 ppm. Pada tanaman biji-bijian misalnya gandum gejala kahat Cu dimulai dari ujung daun muda yang menjadi putih atau keputihan, mengecil dan menggulung yang diikuti oleh pertumbuhan internodus yang terhambat. Selanjutnya juga mempengaruhi proses pembungaan dan pembentukan buah pada fase generatif, serta perkembangan jaringan muda karena rendahnya mobilitas Cu dalam tanaman.

e. Klor (Cl)

Gejala kekurangan Cl tergantung pada tanamannya. Kekurangan unsur ini ditunjukkan dengan gejala klorosis pada daun-daun muda dan kelayuan tanaman yang menyeluruh. Pertumbuhan tanaman pada tanah yang dipengaruhi oleh kandungan garam sering terlihat pada gejala keracunan Cl. Keracunan Cl pada tanaman mengakibatkan terbakarnya ujung-ujung daun dan tepi daun, daun berwarna merah ketuaan, kuning muda dan bercak-bercak pada daun.

f. Boron (B)

Gangguan yang timbul pada metabolisme karbohidrat, merupakan keistimewaan dari kahat B yang terjadi pada tanaman, dimana asimilasi yang terjadi pada daun sedikit sekali. Pada tanaman kahat B, dilaporkan terjadi akumulasi auksin, akibatnya pertumbuhan awal tanaman terganggu. D dilaporkan juga, bahwa B melindungi sistem oksidasi IAA yang sangat kompleks dengan inhibitor dari oksidasi IAA, suatu kemungkinan hubungan antara kahat B dan metabolisme auksin.

DAFTAR PUSTAKA

- Barker, A.V, & Pilbeam, D.J. 2007. Handbook of Plant Nutrition. United States: CRC Press.
<https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.01.003>
- Brady, N.C, dan R. R. Weil. 2002. The Nature and Properties of Soils 13th edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 935 pp
- Damanik, M.M.B.,Hasibuan, B.E.,Fauzi, Sarifuddin.,Hanum, H.H. Kesuburan Tanah dan pemupukan. 2010. USU Press. Medan.
- Marschner, 1995. Mineral Nutrition in Higher Plants, 2nd Edition, Academic Press, London.
- Nurhayati, D. R. 2021. Pengantar Nutrisi Tanaman. UNISRI Press. Surakarta.
- Winarso, S. Kesuburan Tanah. Dasar Kesehatan dan Kualitas Tanah. 2005. Penerbit Gaya Media. Yogyakarta.

BAB 6

MEKANISME PENYEDIAAN DAN PENYERAPAN UNSUR HARA

Oleh Waode Rustiah

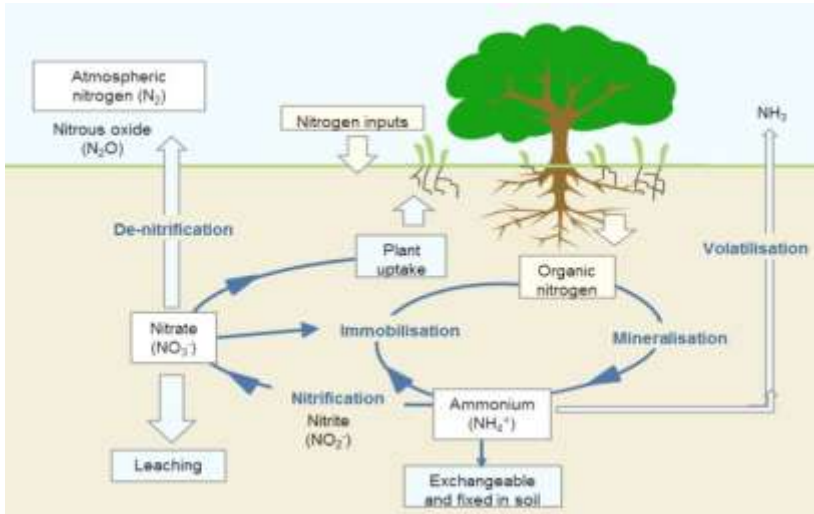
6.1 Pendahuluan

Autotrof adalah istilah untuk organisme yang bergantung sepenuhnya pada bahan anorganik dari lingkungan sekitarnya. Tumbuhan menggunakan cahaya matahari sebagai sumber energi utama untuk menjalankan proses fotosintesis.

Tanah berfungsi sebagai sistem yang kompleks yang mendukung kehidupan tumbuhan dengan menyediakan berbagai kebutuhan dasar, salah satunya adalah air. Selain itu, tanah juga berfungsi sebagai media tanam yang dapat menyediakan nutrisi penting bagi tumbuhan, yang dikenal sebagai unsur hara. Dari sekitar 50 jenis elemen yang ditemukan dalam tumbuhan, hanya 16 di antaranya dianggap sebagai unsur hara esensial untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Tumbuhan menggunakan berbagai proses untuk menyerap unsur hara.

Tersedianya unsur hara dalam jumlah yang memadai di dalam tanah adalah komponen penting yang mendukung pertumbuhan dan hasil produksi tanaman secara optimal. Jika tanah tidak dapat memenuhi kebutuhan unsur hara, pemupukan diperlukan untuk mengatasi kekurangan. Setiap jenis bahan hara memiliki fungsi dan fitur unik, baik dari segi manfaat maupun efek sampingnya. Oleh karena itu, sangat penting untuk menjaga keseimbangan dan mengatur dosis

unsur hara. Pemberian yang berlebihan dapat berdampak buruk pada tanaman, sementara kekurangan unsur hara juga dapat menghambat pertumbuhan dan produksi yang optimal.



Gambar 6. 1 Proses Penyerapan Unsur Hara oleh Tumbuhan

Unsur hara diperlukan dalam jumlah yang berbeda untuk setiap jenis tanaman. Pupuk yang tidak tepat dapat menyebabkan tanaman gagal tumbuh dan berproduksi secara maksimal, membuang sumber daya dan biaya. Untuk meningkatkan efisiensi pemupukan, penting untuk mempertimbangkan tidak hanya kondisi tanah dan lingkungan, tetapi juga jenis hara yang dibutuhkan tanaman. Memahami kebutuhan tanaman terhadap unsur hara dapat membantu Anda memilih jenis pupuk dan dosis yang tepat.

6.2 Akar sebagai Organ Utama Penyerap Nutrisi

Bagian tumbuhan yang biasanya tumbuh di bawah permukaan tanah disebut akar. Rambut akar terbentuk dari tonjolan sel epidermis yang mengarah ke luar, yang meningkatkan area permukaan penyerapan. Air dan mineral

yang terlarut di dalamnya pertama kali diserap melalui celah di antara sel epidermis, melalui rambut akar, atau langsung melewati dinding sel epidermis. Lapisan epidermis pada akar memiliki lapis sel yang tersusun rapat, tetapi dinding selnya yang tipis memudahkan air untuk masuk ke dalam akar. Jaringan epidermis akar tidak memiliki lapisan kutikula, tidak seperti daun. Beberapa jenis akar, seperti anggrek, disebut akar gantung atau akar udara. Akar udara ini dapat tumbuh menjadi velamen, yang terdiri dari beberapa lapis sel dan membantu menyerap air dari udara.

Endodermis adalah jaringan akar satu lapisan sel. Endapan suberin menyebabkan penebalan dinding sel endodermis, terutama di bagian radial dan transversal. Suberin, atau gabus, dilapisi pada endodermis sehingga cairan sulit melewatinya karena sifatnya yang tahan air. Penebalan ini membentuk titik-titik yang disebut titik Caspary, yang kemudian bergabung untuk membentuk pita Caspary. Oleh karena itu, air harus mencapai silinder pusat akar melalui sel endodermis.

6.3 Peranan Mikoriza dalam Tumbuhan

Hubungan simbiotik dan mutualistik antara jamur nonpatogen dan sel-sel hidup tumbuhan disebut mikoriza. Dalam hal ini, tanaman memberikan manfaat dengan meningkatkan penyerapan hara dan air, dan jamur mendapatkan senyawa organik dari tanaman. Akar muda tanaman terinfeksi mikoriza. Dua jenis utama mikoriza adalah ektomikoriza dan endomikoriza; ada juga ektendotrofik, yang merupakan kombinasi ektomikoriza dan endomikoriza. Dalam tumbuhan, mikoriza melakukan fungsi berikut:

1. Penyerapan Nutrisi: Tumbuhan lebih mampu menyerap air dan nutrisi, terutama fosfor yang sulit diserap, karena mikoriza. Struktur jamur mikoriza yang disebut hifa

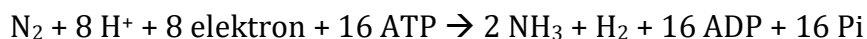
memperluas area penyerapan akar, memungkinkan tumbuhan menyerap lebih banyak air dan mineral.

2. Perlindungan terhadap Patogen: Akar tumbuhan dapat dilindungi dari serangan patogen tanah karena jamur mikoriza membentuk lapisan pelindung pada akar yang dapat mencegah infeksi oleh mikroorganisme patogen.
3. Meningkatkan Toleransi terhadap Stres: Mikoriza membantu tumbuhan lebih tahan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan atau tingkat salinitas tinggi. Ini terjadi karena mikoriza meningkatkan kemampuan tumbuhan untuk menyerap air dan nutrisi, yang membantunya bertahan dalam kondisi lingkungan yang tidak ideal.
4. Peningkatan Pertumbuhan Tumbuhan: Melalui simbiosis ini, mikoriza membantu tumbuhan mengakses nutrisi penting yang mungkin sulit mereka dapatkan di tanah. Ini membantu pertumbuhan vegetatif menjadi lebih baik.
5. Sumber Energi: Melalui fotosintesis, tumbuhan memberikan gula mikoriza karbon sebagai imbalan atas layanan yang diberikan oleh mikoriza. Karena jamur tidak dapat membuat makanan mereka sendiri, ini adalah keuntungan bagi mereka.

Dengan memperbaiki kesehatan tanah dan mendukung pertumbuhan tumbuhan, mikoriza memainkan peran penting dalam ekosistem tanah dan pada akhirnya membantu menjaga keseimbangan alam.

Mayerni dan Hervani (2008) mengatakan bahwa tanaman selasih dapat menjadi lebih tinggi jika diberi mikoriza. Karena proses penyerapan hara yang dibutuhkan tanaman menjadi lebih efektif, tanaman yang terinfeksi mikoriza menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik, termasuk tinggi tanaman dan luas daun yang lebih besar. Hal ini membantu metabolisme pertumbuhan tanaman, terutama saat tanaman mulai berkembang dari fase vegetatif ke fase generatif. Namun, tanaman tidak dapat memanfaatkan N

dalam bentuk gas N_2 , meskipun unsur ini sangat banyak di udara, mencapai 78%. Hanya dalam bentuk yang lebih mudah diakses, seperti ammonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-), tanaman dapat menyerap N. Akibatnya, N_2 harus diubah menjadi bentuk N yang terikat sebelum dapat digunakan. Proses fisikasi N dapat terjadi secara kimiawi melalui proses industri, yang menghasilkan pupuk anorganik seperti urea, atau secara biologis melalui berbagai mikroba yang menyimpan N, baik dalam hubungan simbiotik maupun non-simbiotik. Persamaan kimia berikut menunjukkan bagaimana bakteri penambat N mengikat N:



Untuk membentuk dua molekul amoniak, satu molekul gas nitrogen membutuhkan enam belas molekul ATP serta pasokan proton dan elektron. Organisme prokariot seperti bakteri dapat melakukan reaksi kimia ini dengan menggunakan kompleks enzim nitrogenase.

Mikroba pelarut P dan K adalah kelompok mikroba lain yang berfungsi sebagai pupuk hayati. Tanah pertanian biasanya memiliki kandungan fosfor yang tinggi (jenuh), tetapi fosfor ini sedikit atau tidak tersedia bagi tanaman karena terikat pada mineral liat tanah. Mikroba pelarut P bertanggung jawab untuk melepaskan ikatan fosfor dari mineral liat dan membuat fosfor tersedia untuk tanaman. Berbagai jenis mikroba, termasuk *Bacillus megatherium*, *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., dan *Pseudomonas* sp., memiliki kemampuan melarutkan P. Mikroba yang memiliki kemampuan tinggi untuk melarutkan P biasanya juga memiliki kemampuan tinggi untuk melarutkan K.

6.4 Kondisi Tanah dan Ketersediaan Nutrisi

Tanah adalah mineral yang tidak terpadatkan yang terletak di permukaan bumi dan berfungsi sebagai media alami untuk pertumbuhan tanaman darat. Namun, karakteristik dan kualitas tanah banyak diubah oleh praktik pengelolaan tanah yang dipengaruhi oleh faktor genetik dan lingkungan. Perubahan ini dapat mempengaruhi suhu, kelembaban, kandungan oksigen, dan sifat kimiawi tanah. Selain itu, hal-hal seperti kekurangan atau keracunan unsur hara juga dapat terjadi, karena semuanya berhubungan satu sama lain. Modifikasi zona perakaran tanaman adalah topik utama diskusi ini, terutama yang berkaitan dengan pemulihan kekurangan unsur hara.

Dua faktor yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman adalah tanah dan ketersediaan hara. Tanah memberi tanaman tempat untuk tumbuh dan berkembang, sementara ketersediaan hara atau nutrisi dalam tanah sangat mempengaruhi kesehatan dan produktivitas tanaman.

Tanah: Sifat fisik, kimia, dan biologi tanah dipengaruhi oleh berbagai komponennya, termasuk mineral, bahan organik, air, dan udara. Tanah yang subur memiliki struktur yang baik dan memiliki jumlah air yang cukup dan udara yang cukup untuk akar tanaman. Berbagai jenis tanah, seperti lempung, pasir, atau humus, mempengaruhi cara tanaman menyerap air dan hara. Ketersediaan Hara: Unsur-unsur seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S), bersama dengan mikronutrien lainnya, dibutuhkan tanaman untuk tumbuh dengan baik. Hara juga dikenal sebagai nutrisi yang tersedia di tanah. Sementara beberapa hara terikat langsung di tanah dan dapat diserap oleh tanaman, yang lainnya harus diubah menjadi bentuk yang dapat diserap oleh mikroorganisme atau proses kimia.

Beberapa faktor, seperti pH tanah, tekstur, kapasitas tukar kation (CTC), dan aktivitas mikroorganisme di tanah, memengaruhi ketersediaan hara. Tanah yang terlalu asam atau basa juga dapat mengurangi ketersediaan hara penting seperti fosfor. Tanah yang miskin mikroorganisme juga dapat membatasi proses penguraian bahan organik menjadi hara yang dapat digunakan tanaman. Oleh karena itu, keberhasilan pertanian dan pertumbuhan tanaman sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah yang baik dan ketersediaan hara yang ideal.

6.5 Lintasan Pergerakan Hara Pada Jaringan Akar

Untuk memastikan bahwa tumbuhan dapat memperoleh unsur hara yang diperlukan untuk pertumbuhannya, proses yang sangat penting adalah pergerakan hara (nutrisi) menuju dan di dalam jaringan akar. Proses ini mencakup berbagai fase yang kompleks, mulai dari penyerapan hara oleh akar hingga penyebarannya ke bagian lain tanaman.



Gambar 6.2 Penyerapan unsur hara di akar

Lintasan pergerakan hara menuju dan di dalam jaringan akar dijelaskan di sini:

1. **Penyerapan Hara oleh Akar:** Ketika akar tanaman bersentuhan dengan larutan tanah yang mengandung unsur hara, proses penyerapan hara dimulai. Air tanah

mengandung nutrisi seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan mikroelement lainnya, yang dapat diserap oleh akar melalui dua mekanisme utama: permeabilitas sel dan aktivitas transportasi aktif.

- **Permeabilitas Sel:** Karena perbedaan konsentrasi unsur hara antara tanah dan sel akar, unsur hara yang terlarut dalam air tanah dapat masuk ke dalam sel-sel akar melalui proses difusi pasif. Molekul hara bergerak dari area dengan konsentrasi tinggi (tanah) ke area dengan konsentrasi lebih rendah (sel akar).
- **Transportasi Aktif:** Untuk memindahkan beberapa unsur hara, terutama ion-ion seperti nitrogen (NH_4^+ , NO_3^-) dan kalium (K^+), energi diperlukan untuk bergerak melawan gradien konsentrasi. Proses ini terjadi di membran sel akar, yang menggunakan energi ATP untuk memindahkan ion ke dalam sel akar.

2. **Pergerakan Hara di Dalam Jaringan Akar:** Setelah unsur hara diserap oleh sel akar, mereka harus bergerak melalui jaringan akar untuk sampai ke xilem dan floem, yang merupakan bagian dari vaskularisasi tanaman. Hara bergerak melalui dua jalur utama: jalur simplast dan jalur apoplast.

- **Jalur Apoplast:** Hara yang bergerak melalui jalur apoplast tidak melintasi membran sel, tetapi melalui ruang antar sel dan dinding sel yang relatif longgar. Kapilaritas, atau daya hisap, dan tekanan osmotik adalah dua cara hara dapat bergerak. Tetapi pada titik tertentu, jalur apoplast akan dibatasi oleh Casparian Strip, sebuah lapisan penghalang di endodermis akar yang memungkinkan hara masuk secara selektif ke dalam sel.
- **Jalur Simplast:** Jalur ini mengangkut hara melalui protoplasma sel akar melalui plasmodesmata, yaitu saluran mikroskopis yang menghubungkan sel-sel. Hara bergerak dari satu sel ke sel lainnya melalui membran sel, yang mengontrol masuknya dan

keluarnya zat tertentu. Jalur simplast memungkinkan hara bergerak lebih mudah dan memiliki kontrol yang lebih besar atas jenis hara yang dapat masuk ke dalam sel tanaman.

3. Transportasi ke Xilem dan Floem Unsur hara memasuki sistem vaskuler tanaman, yang terdiri dari xilem dan floem, setelah melewati jaringan akar.
 - Xilem mengangkut air dan mineral dari akar ke seluruh tanaman, terutama daun, melalui aliran air yang dihasilkan oleh transpirasi (penguapan air dari daun) dan tekanan akar (*pressure root*) dan aliran pasif yang didorong oleh transpirasi.
 - Floem: Floem berfungsi sebagai pengangkut produk fotosintesis, seperti gula, dari daun ke seluruh tanaman. Namun, floem juga membantu menyebarkan hara dalam bentuk larutan dari akar ke seluruh tanaman, terutama selama fase pertumbuhan.
4. Distribusi Hara ke Bagian Tanaman Lain: Setelah unsur hara mencapai xilem dan floem, mereka akan didistribusikan ke bagian tanaman lain yang membutuhkannya, seperti daun, bunga, dan buah. Sebagai contoh, fosfor (P) membentuk DNA dan RNA, nitrogen (N) membentuk protein dan enzim, dan kalium (K) memastikan keseimbangan air dan fungsi enzim dalam sel. Hara akan diserap oleh akar dan didistribusikan melalui jaringan vaskuler ke jaringan tumbuhan lainnya untuk mendukung pertumbuhan, pembentukan bunga dan buah, dan meningkatkan ketahanan terhadap stres.
5. Pengaturan Ketersediaan Hara di Akar: Sistem akar tanaman juga dapat mengatur ketersediaan hara dalam tanah. Melalui proses tertentu, akar dapat menghasilkan asam organik untuk melarutkan unsur hara yang terikat pada mineral tanah, sehingga meningkatkan ketersediaan hara yang dibutuhkan tanaman. Selain itu, mikroba

(mikoriza) pada permukaan akar dan di dalam tanah membantu tanaman menyerap hara seperti kalium dan fosfor, yang sulit diserap langsung oleh akar.

6.6 Prinsip Penyerapan Hara oleh Tanaman

Proses penting yang memastikan tanaman mendapatkan nutrisi yang dibutuhkannya untuk pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi adalah penyerapan hara oleh tanaman. Prinsip penyerapan hara bergantung pada mekanisme fisik dan kimia yang terjadi di permukaan dan di dalam jaringan akar. Ion-ion yang berasal dari larutan tanah dapat diserap oleh akar tanaman. Berikut penjelasan menyeluruh tentang 4 prinsip penyerapan unsur hara dalam bentuk ion oleh tumbuhan:

6.6.1 Membran Sel yang Tidak Aktif Secara Metabolik Atau Mati, Akan Menjadi Lebih Mudah Dilewati oleh Bahan Terlarut

Apabila sel tumbuhan tidak melakukan aktivitas metabolisme atau mengalami kerusakan, membrannya menjadi lebih permeabel. Dalam hal ini, bahan terlarut (*solute*), seperti ion nutrisi, lebih mudah menembus membran sel daripada saat sel masih aktif.

6.6.2 Molekul Air dan Gas Terlarut Dapat Menembus Membrane dengan Mudah

Molekul-molekul kecil seperti air (H_2O) serta gas-gas terlarut dalam larutan tanah, seperti nitrogen (N_2), oksigen (O_2), dan karbon dioksida (CO_2), dapat dengan mudah melewati membran sel. Hal ini disebabkan oleh sifat molekul tersebut yang kecil, nonpolar, dan mampu bergerak secara pasif melalui pori-pori membran.

6.6.3 Zat Terlarut yang Bersifat Hidrofobik Menembus Membrane Sesuai dengan Kelarutannya dalam Lemak

Bahan terlarut yang bersifat hidrofobik (tidak larut dalam air) dapat menembus membran sel dengan kemudahan yang sebanding dengan tingkat kelarutannya dalam lemak. Semakin tinggi kelarutan suatu zat dalam lemak, semakin mudah zat tersebut melewati membran, karena membran sel sebagian besar terdiri dari lapisan lipid.

6.6.4 Ion dan Molekul Hidrofilik Menembus Membrane Dengan Kemudahan yang Berbanding Terbalik dengan Ukurannya

Molekul atau ion yang bersifat hidrofilik (larut dalam air) memiliki tingkat kemudahan menembus membran yang bergantung pada ukurannya. Semakin kecil ukuran atau berat molekul suatu ion atau molekul, semakin mudah zat tersebut menembus membran. Sebaliknya, molekul yang lebih besar akan menghadapi lebih banyak hambatan saat melewati membran sel.

6.7 Karakteristik Penyerapan Hara oleh Tanaman

Serapan unsur hara oleh tanaman memiliki beberapa karakteristik penting yang memengaruhi bagaimana tanaman menyerap nutrisi dari tanah yang bersifat *akumulatif* yang berarti bahwa konsentrasi unsur hara di dalam sel lebih tinggi daripada di luar sel karena penyerapan unsur hara; *selektif*, yang berarti bahwa serapan suatu ion tidak dipengaruhi oleh adanya ion lain dengan muatan yang sama, terutama ion yang berbeda valensinya. Ini berlaku untuk kedua ion dan senyawa organik. Sifat ini tidak benar sepenuhnya karena beberapa ion menghadapi hambatan karena kompetitif; *satu arah* (*uni-directional*), Dalam satu arah, ion yang masuk ke sitosol akan

lebih dipacu daripada ion yang keluar, yang akan terhambat kecuali dalam kasus di mana suhu tinggi menyebabkan kebocoran membran dan *tidak dapat jenuh*, serapan ion tidak dapat mencapai jenuh hingga konsentrasi tinggi. Protein pembawa akan berfungsi pada membran tetapi tidak akan mempengaruhi serapan.

Proses serapan hara tanaman sangat kompleks dan dipengaruhi oleh banyak faktor fisik, kimia, dan biologi tanah. Berikut adalah karakteristik utama proses serapan hara oleh tanaman:

6.7.1 Spesifitas Penyerapan Hara

Tanaman dapat memilih untuk menyerap hara tertentu melalui akar dalam bentuk ion-ion tertentu yang sesuai dengan kebutuhan tanaman. Sebagai contoh: Proses penyerapan ini dibantu oleh protein pembawa (*protein carrier*) di membran sel akar, yang memastikan hanya ion tertentu yang dapat masuk ke dalam sel. Ion nitrogen (N) diserap dalam bentuk ion nitrat (NO_3^-) atau ammonium (NH_4^+), dan ion fosfor (P) diserap dalam bentuk ion fosfat (H_2PO_4^- atau HPO_4^{2-}).

6.7.2 Penyerapan Aktif dan Pasif

Dua mekanisme utama yang bertanggung jawab atas penyerapan hara adalah sebagai berikut:

1. Penyerapan Pasif adalah proses yang menyerap hara tanpa energi. Hara bergerak dari konsentrasi tinggi di larutan tanah ke konsentrasi rendah di akar melalui gradien konsentrasi. Proses penyerapan pasif terjadi melalui difusi dan aliran massa air.
2. Penyerapan Aktif adalah penyerapan yang menyerap hara melawan gradien konsentrasi membutuhkan energi (ATP). Mekanisme ini melibatkan pompa ion yang sudah ada di membran sel akar. Salah satu contohnya adalah penyerapan ion kalium (K^+) dan

fosfat (PO_4^{3-}), yang terjadi meskipun konsentrasi hara di dalam dan di luar sel akar lebih rendah.

6.7.3 Kompetisi Antar Ion dalam Penyerapan

Dalam tanah, beberapa ion memiliki muatan yang sama dan dapat bersaing untuk diserap oleh tanaman. Contohnya:

1. Ion kalium (K^+) dapat bersaing dengan ion natrium (Na^+) untuk diambil oleh akar.
2. Ion nitrat (NO_3^-) dapat bersaing dengan ion klorida (Cl^-).

Kompetisi ini memengaruhi efisiensi penyerapan hara oleh tanaman. Jika ion yang tidak dibutuhkan oleh tanaman (misalnya Na^+) lebih banyak tersedia di tanah, maka ion tersebut akan menghambat penyerapan ion yang dibutuhkan (seperti K^+).

6.7.4 Ketersediaan Hara di Zona Perakaran

Hara yang dapat diserap oleh tanaman harus tersedia di zona perakaran dalam bentuk terlarut. Tiga mekanisme utama yang memengaruhi pergerakan hara menuju akar adalah:

1. Difusi – Pergerakan ion hara dari area dengan konsentrasi tinggi (di sekitar partikel tanah) ke area dengan konsentrasi rendah (di sekitar akar). Proses ini terjadi secara pasif dan bergantung pada perubahan konsentrasi hara.
2. Aliran Massa (*Mass Flow*) – Salah satu mekanisme utama untuk penyerapan hara seperti nitrogen, kalsium, dan magnesium adalah aliran massa, yang terjadi ketika ion-ion hara dibawa ke akar oleh aliran air, yang menarik air dari akar ke daun.
3. Intersepsi Akar – Pergerakan terjadi ketika akar tumbuh dan menembus partikel tanah, sehingga langsung bersentuhan dengan ion-ion hara, karena

sistem perakaran lebih luas, lebih banyak hara yang dapat diakses melalui mekanisme ini.

Berikut perbandingan 3 mekanisme sistem hara :

Tabel 6. 1 Perbandingan Tiga Mekanisme Sistem Hara

Mekanisme	Proses Utama	Jenis Hara yang Diserap	Faktor yang Mempengaruhi
Aliran Massa	Hara bergerak bersama aliran air	Nitrogen, Kalsium, Magnesium	Kelembapan tanah, Transpirasi
Difusi	Hara bergerak dari konsentrasi tinggi ke rendah	Fosfor, Kalium, Unsur Mikro	Konsentrasi hara, Jarak akar, Kelembapan
Intersepsi Akar	Akar menyentuh partikel tanah	Kalsium, Magnesium, Unsur Mikro	Pertumbuhan akar, Tekstur tanah

6.7.5 Faktor yang Mempengaruhi Penyerapan Hara

Beberapa faktor yang memengaruhi karakteristik serapan hara oleh tanaman meliputi:

1. pH Tanah
Ketersediaan hara sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Misalnya, fosfor lebih mudah tersedia di pH netral, sedangkan unsur mikro seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) lebih tersedia di tanah dengan pH rendah.
2. Kelembaban Tanah
Ketersediaan air sangat penting untuk melarutkan hara dan memudahkan pergerakannya menuju akar. Tanah yang kering akan menghambat penyerapan hara.

3. Jenis dan Luas Sistem Perakaran
Tanaman dengan akar yang luas dan bercabang akan lebih efisien dalam menyerap hara dibandingkan tanaman dengan sistem perakaran yang dangkal.
4. Aktivitas Mikroorganisme
Mikroorganisme tanah, seperti bakteri penambat nitrogen dan mikoriza, dapat meningkatkan ketersediaan hara bagi tanaman.

6.7.6 Mobilitas Hara di Dalam Tanaman

Setelah diserap oleh akar, hara akan didistribusikan ke seluruh bagian tanaman melalui jaringan vaskular (xilem dan floem). Hara dibagi menjadi dua kategori berdasarkan mobilitasnya:

1. Hara Mobile
Hara yang dapat bergerak dari daun tua ke daun muda jika terjadi defisiensi. Contohnya: Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K).
2. Hara Imobile
Hara yang tidak dapat dipindahkan ke jaringan lain, sehingga gejala kekurangan akan terlihat pertama kali di daun muda. Contohnya: Kalsium (Ca), Besi (Fe), dan Boron (B).

6.8 Mekanisme Penyerapan Hara oleh Tanaman

Tanaman memperoleh unsur hara dari tanah melalui tiga mekanisme utama, yaitu aliran massa (*mass flow*), difusi, dan intersepsi akar (*root interception*). Ketiga mekanisme ini berperan penting dalam memastikan tanaman mendapatkan unsur hara yang dibutuhkan untuk pertumbuhan, perkembangan, dan hasil produksi. Masing-masing mekanisme memiliki fitur, cara kerja, dan komponen yang mempengaruhi seberapa efektif mereka.

6.8.1 Aliran Massa (Mass Flow)

Aliran massa merupakan mekanisme di mana unsur hara di dalam tanah bergerak menuju akar bersama dengan aliran air yang diserap oleh tanaman. Proses ini terjadi karena aktivitas transpirasi tanaman, yang menyebabkan air diambil dari tanah dan dibawa ke jaringan tanaman melalui sistem perakaran. Ketika air bergerak ke akar, unsur hara yang terlarut dalam air, seperti nitrogen (N), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg), ikut terbawa ke zona perakaran dan diserap oleh tanaman.

Aliran massa sangat dipengaruhi oleh tingkat transpirasi tanaman. Pada kondisi cuaca panas atau saat kelembapan udara rendah, laju transpirasi meningkat, sehingga lebih banyak air yang diserap oleh akar tanaman. Hal ini menyebabkan peningkatan aliran massa dan mempercepat pergerakan unsur hara ke akar. Selain transpirasi, kelembapan tanah juga memengaruhi proses ini. Tanah yang cukup lembap akan lebih efektif dalam menyediakan unsur hara melalui aliran massa, sedangkan tanah yang kering cenderung menghambat pergerakan air dan hara.

Unsur hara yang diserap melalui mekanisme aliran massa biasanya merupakan unsur yang dibutuhkan dalam jumlah besar (makronutrien) dan mudah larut dalam air. Contohnya adalah nitrogen dalam bentuk nitrat (NO_3^-), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}). Mekanisme aliran massa sangat penting dalam penyediaan hara bagi tanaman yang mengalami transpirasi tinggi, seperti jagung dan padi.

6.8.2 Difusi

Difusi adalah proses pergerakan ion-ion hara dari area dengan konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah di sekitar zona perakaran tanaman. Mekanisme ini terjadi akibat adanya perbedaan konsentrasi ion hara di tanah dan zona perakaran.

Setelah akar menyerap hara dari larutan tanah, terbentuklah zona penipisan di sekitar akar, di mana konsentrasi ion hara menjadi lebih rendah dibandingkan dengan tanah di sekitarnya. Ion-ion hara kemudian bergerak dari area yang memiliki konsentrasi tinggi ke zona penipisan tersebut untuk menyeimbangkan konsentrasi hara.

Difusi terjadi secara pasif tanpa memerlukan energi dari tanaman, dan kecepatan difusi bergantung pada konsentrasi ion hara di dalam tanah. Semakin tinggi konsentrasi hara di tanah, semakin cepat proses difusi terjadi. Sebaliknya, jika konsentrasi hara rendah, difusi akan berjalan lambat, sehingga penyerapan hara oleh tanaman menjadi terhambat.

Unsur hara yang diserap melalui mekanisme difusi umumnya adalah unsur yang tidak mudah larut dalam air dan cenderung bergerak lambat di tanah. Contoh unsur yang diserap melalui difusi adalah fosfor (P) dalam bentuk ion H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} , serta kalium (K^+). Fosfor, khususnya, sangat bergantung pada mekanisme difusi karena mobilitasnya di tanah sangat rendah. Oleh karena itu, tanaman yang kekurangan fosfor dapat mengalami pertumbuhan akar yang terhambat, karena akar tidak mampu menjangkau hara tersebut jika mekanisme difusi tidak optimal. Faktor yang memengaruhi proses difusi meliputi kelembapan tanah, konsentrasi ion hara di tanah, dan jarak antara partikel tanah dengan akar. Tanah yang cukup lembap akan memudahkan pergerakan ion-ion hara melalui air tanah, sementara tanah kering dapat memperlambat difusi.

6.8.3 Intersepsi Akar (*Root Interception*)

Intersepsi akar adalah mekanisme di mana akar tanaman menyerap unsur hara dengan cara bersentuhan langsung dengan partikel tanah yang mengandung hara. Mekanisme ini terjadi ketika akar tumbuh dan menembus tanah, sehingga akar menyentuh partikel tanah yang

mengandung ion-ion hara. Unsur hara yang terikat pada partikel tanah kemudian dilepaskan dan diserap oleh akar.

Proses intersepsi akar bergantung pada kemampuan akar untuk tumbuh dan memperluas area kontak dengan tanah. Semakin luas sistem perakaran, semakin besar kemungkinan akar menyentuh partikel tanah yang mengandung unsur hara. Oleh karena itu, tanaman dengan sistem akar yang dalam dan luas cenderung lebih efektif dalam menyerap hara melalui mekanisme ini.

Unsur hara yang diserap melalui intersepsi akar umumnya adalah kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan berbagai unsur mikro seperti tembaga (Cu), seng (Zn), dan boron (B). Mekanisme ini sangat penting untuk penyediaan unsur-unsur hara yang terikat kuat pada partikel tanah dan sulit larut dalam air.

Faktor yang memengaruhi mekanisme intersepsi akar meliputi pertumbuhan akar, tekstur tanah, dan ketersediaan hara di partikel tanah. Tanah dengan tekstur halus, seperti tanah liat, memiliki lebih banyak partikel yang mengandung hara, sehingga intersepsi akar dapat terjadi lebih efektif. Selain itu, tanaman dengan sistem perakaran yang luas, seperti pohon, memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyerap unsur hara melalui mekanisme ini.

6.7 Perbandingan Ketiga Mekanisme Serapan Hara

Ketiga mekanisme serapan hara bekerja secara sinergis untuk memastikan tanaman memperoleh unsur hara yang diperlukan untuk pertumbuhan. Aliran massa berperan penting dalam penyediaan unsur hara makro yang larut dalam air dan dibutuhkan dalam jumlah besar. Difusi berfungsi untuk menyediakan unsur hara yang kurang bergerak di tanah, seperti fosfor dan kalium. Sementara itu, intersepsi akar memungkinkan tanaman menyerap unsur hara yang terikat pada partikel tanah melalui kontak langsung dengan akar.

Setiap mekanisme memiliki karakteristik unik dan bergantung pada faktor-faktor lingkungan seperti kelembapan tanah, konsentrasi hara, serta kemampuan tanaman dalam memperluas sistem perakarannya. Dengan memahami mekanisme ini, petani dapat mengelola tanah dan pemupukan dengan lebih baik, sehingga tanaman dapat memanfaatkan unsur hara secara optimal dan menghasilkan pertumbuhan yang sehat serta produktivitas yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Dwidjoseputro, D. 1980. *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*. Cetakan keenam. PT.Gramedia, Jakarta.
- Fitter, A. H. dan Hay R. K. M. 1981. *Fisiologi Lingkungan Tanaman*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hardjowigeno, Sarwono. 1989. *Ilmu Tanah*. Melton Putra, Jakarta.
- Lakitan, Benyamin. 2010. *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. Rajawali Press. Jakarta
- Hamim. 2007. *Ekofisiologi Tanaman*. Universitas Padjajaran. Bandung.
- Jumin, H. B. 1989. *Ekologi Tanaman Suatu Pendekatan Fisiologi*. Cetakan kedua. Rajawali Press, Jakarta.
- Kemas, A. H. 2007. *Dasar-dasar Ilmu Tanah*. PT. Raja Grafindo Persada. Jakarta.
- Mayerni, R. dan D. Hervani. 2008. *Pengaruh jamur mikoriza arbuskula terhadap pertumbuhan tanaman selasih (Ocimum sanctum L.)*. Jurnal Akta Agrosia 11: 7-12.

BAB 7

UNSUR FOSFOR DALAM TANAH

Oleh Eso Solihin

7.1 Pendahuluan

Fosfor (P) merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang sangat diperlukan oleh semua organisme hidup. Unsur ini menjadi bagian utama dari molekul biologis penting seperti DNA, RNA, dan ATP yang berperan dalam proses metabolisme dan penyimpanan energi. Fosfor tidak hanya penting untuk pertumbuhan tanaman, tetapi juga memiliki fungsi vital dalam mendukung aktivitas biokimia pada hewan dan manusia. Dalam tanaman, fosfor membantu memperkuat struktur sel, meningkatkan efisiensi fotosintesis, dan mendukung pertumbuhan akar yang optimal. Dalam ekosistem tanah, fosfor memegang peran kunci sebagai elemen yang terlibat dalam siklus biogeokimia. Lebih dari 90% fosfor dalam sistem tanah–tanaman–hewan terkandung di dalam tanah. Namun, meskipun jumlah total fosfor dalam tanah sering kali besar, hanya sebagian kecil yang tersedia untuk tanaman. Hal ini terjadi karena sebagian besar fosfor berada dalam bentuk tidak larut atau terikat secara kuat pada mineral tanah, sehingga tidak dapat dimanfaatkan langsung oleh tanaman.

Kandungan fosfor dalam tanah bervariasi secara signifikan, tergantung pada jenis tanah dan lokasi geografisnya. Secara umum, kadar fosfor total di tanah berkisar antara 200 hingga 5000 ppm, dengan rata-rata sekitar 600 ppm. Namun, dari jumlah tersebut, hanya sekitar

0,1% yang tersedia untuk tanaman dalam bentuk ion fosfat larut. Perbedaan geografis juga memengaruhi distribusi fosfor; misalnya, tanah di wilayah padang rumput sering kali memiliki kandungan fosfor total yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah di daerah humid tropis. Meskipun tanah padang rumput kaya akan fosfor total, sebagian besar fosfor tersebut tidak tersedia bagi tanaman karena keberadaannya dalam bentuk yang sulit diserap tanaman, seperti yang terikat pada kalsium di tanah alkalin atau aluminium dan besi di tanah masam. Oleh karena itu, ketersediaan fosfor tidak selalu berkorelasi dengan jumlah total fosfor dalam tanah. Hal ini menunjukkan pentingnya memahami dinamika fosfor dalam tanah untuk mendukung efisiensi pengelolaan hara.

Fosfor dalam tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti pH, kandungan bahan organik, tekstur tanah, serta aktivitas mikroorganisme. Pada tanah masam, fosfor cenderung membentuk senyawa kompleks dengan aluminium dan besi, sedangkan pada tanah alkalin, fosfor terikat dengan kalsium. Aktivitas mikroorganisme tanah juga berperan penting dalam menguraikan bahan organik yang mengandung fosfor dan melepaskannya ke dalam larutan tanah dalam bentuk yang tersedia bagi tanaman. Ketersediaan fosfor juga sangat dipengaruhi oleh praktik pengelolaan tanah dan pemupukan. Aplikasi pupuk fosfat sering kali menjadi solusi untuk mengatasi kekurangan fosfor yang tersedia di tanah. Namun, pemupukan yang berlebihan dapat menyebabkan akumulasi fosfor di tanah, yang pada gilirannya meningkatkan risiko pencemaran lingkungan, seperti eutrofikasi di badan air. Oleh karena itu, diperlukan strategi pemupukan yang efisien dan ramah lingkungan.

Penggunaan mikroba pelarut fosfat, seperti bakteri dan jamur tertentu, merupakan salah satu pendekatan inovatif dalam meningkatkan ketersediaan fosfor di tanah. Mikroba ini mampu melarutkan fosfat yang terikat pada mineral tanah

dan bahan organik, sehingga meningkatkan efisiensi serapan fosfor oleh tanaman. Selain itu, pengelolaan tanaman penutup tanah dan rotasi tanaman juga dapat membantu memperbaiki siklus fosfor di tanah. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan dan interaksi berbagai bentuk fosfor dalam tanah sangat penting untuk mendukung pengelolaan fosfor yang berkelanjutan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi dinamika fosfor dalam berbagai tipe tanah dan kondisi lingkungan. Dengan pendekatan yang holistik dan berbasis ilmiah, pengelolaan fosfor yang efisien dapat membantu meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menjaga kelestarian lingkungan.

Ketersediaan fosfor bagi tanaman sangat menentukan kelangsungan hidup tanaman, karena kekurangan fosfor menyebabkan gangguan terhadap penyerapan unsur hara lainnya. Selain itu, sifat imobil dari unsur P dalam tanah menyebabkan unsur ini cepat sekali berkurang konsentrasinya di dalam larutan tanah. Pada umumnya terdapat tiga masalah P yaitu jumlah total dalam tanah rendah ketidaktersediaan P yang sudah ada dalam tanah dan fiksasi fosfat dapat larut yang ditambahkan. Fosfor tanah berasal dari pembebasan dalam bentuk terlarut di dalam tanah yang berasal dari pelapukan mineral primer, tambahan dari sisa-sisa tanaman, dan pemupukan. Sumber utama P adalah bahan induk. Bahan induk berbagai fosfat di alam adalah mineral apatit yang terdiri dari 96% trikalsium fosfat.

7.2 Sumber Fosfor dalam Tanah

Fosfor merupakan salah satu elemen vital bagi perkembangan tanaman, meski sering kali ketersediaannya di dalam tanah menjadi kendala utama. Kekurangan fosfor umumnya terjadi karena unsur ini berada dalam bentuk yang sukar dimanfaatkan oleh akar tanaman. Namun, ketersediaan fosfor di tanah sering kali menjadi masalah utama dalam

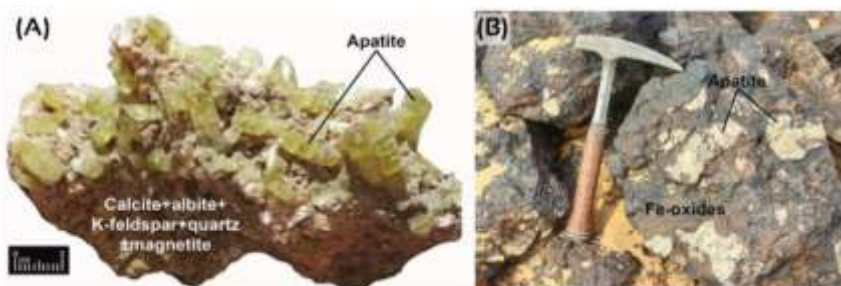
pertanian, terutama karena keterbatasannya yang tinggi dalam bentuk yang dapat diambil oleh tanaman. Tanah yang kekurangan fosfor biasanya memiliki kondisi di mana senyawa fosfat yang terkandung tidak larut atau terjebak dalam kompleks mineral yang sulit terurai. Salah satu bentuk fosfor yang lebih mudah tersedia adalah kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) dan magnesium fosfat ($\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$). Kedua senyawa ini cukup reaktif, namun ketersediaannya sangat dipengaruhi oleh pH tanah, kondisi aerasi, dan kehadiran ion-ion lainnya. Di sisi lain, senyawa fosfat yang mengandung besi (Fe) dan aluminium (Al) lebih umum ditemukan dalam tanah yang bereaksi masam dengan pH rendah, tetapi stabilitasnya yang tinggi pada kondisi tersebut menjadikannya sumber fosfor yang kurang efisien bagi tanaman. Dalam kondisi seperti ini, peran pengelolaan tanah, seperti pengapuran untuk meningkatkan pH, menjadi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan fosfor di tanah masam. Faktor lain yang memengaruhi ketersediaan fosfor adalah interaksi antara bahan organik dan mikroorganisme tanah yang dapat mengubah fosfat tidak tersedia menjadi bentuk yang larut dan dapat digunakan oleh akar tanaman. Oleh karena itu, pendekatan holistik yang mencakup aspek kimia, fisik, dan biologi tanah sangat penting untuk memastikan bahwa fosfor dapat dimanfaatkan secara optimal oleh tanaman.

Sumber fosfor di dalam tanah berasal dari hasil disintegrasi dan dekomposisi batuan yang mengandung mineral apatit, yang terbagi atas tiga jenis mineral apatit yang ada di alam diantaranya flour (F) apatit, khlor (Cl) apatit, dan hidroksi (OH) apatit (Barber 1984). Mineral utama yang menjadi sumber fosfor dalam tanah adalah apatit, yang memiliki peran penting dalam siklus geologi dan penyediaan fosfor alami. Mineral ini terbentuk selama proses pembentukan batuan dan tersebar luas dalam berbagai jenis batuan, baik beku, sedimen, maupun metamorf. Apatit

terbentuk dalam berbagai bentuk senyawa kimia, di antaranya adalah fluorapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) dan khlorapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$), yang merupakan bentuk paling umum ditemukan, serta hidroksida apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$), yang lebih jarang dijumpai. Fluorapatit dan khlorapatit memiliki karakteristik fisik seperti densitas (DK) sekitar 5,0 dan berat jenis (BJ) antara 3,17 hingga 3,23, menjadikannya cukup stabil di lingkungan alami. Mineral ini ditemukan dalam hampir semua jenis batuan, meskipun lebih sering dijumpai pada batuan basa. Keberadaan apatit dalam batuan sering kali berupa kristal kecil yang tersebar, sehingga jarang ditemukan dalam jumlah besar. Pelapukan apatit di bawah pengaruh air yang mengandung asam karbonat menjadi mekanisme utama pembebasan fosfor ke dalam tanah. Dalam proses ini, asam karbonat bereaksi dengan apatit, membebaskan kalsium dan fosfat terlarut yang dapat diserap oleh akar tanaman. Proses ini penting, terutama di wilayah dengan intensitas curah hujan tinggi, di mana pelapukan batuan lebih cepat terjadi, meningkatkan ketersediaan fosfor di tanah. Selain itu, peran aktivitas manusia, seperti penggalian batuan untuk produksi pupuk fosfat, juga berkontribusi pada distribusi apatit dalam ekosistem pertanian. Dengan demikian, keberadaan dan pelapukan apatit menjadi aspek penting dalam memahami dinamika fosfor di tanah serta pengelolaannya dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Mineral fosfat sekunder lain yang berperan sebagai sumber tambahan fosfor adalah vivianit ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). Vivianit dikenal sebagai mineral dengan warna kebiruan, sehingga sering disebut sebagai "tanah biru." Mineral ini terbentuk pada lingkungan reduksi di mana konsentrasi oksigen rendah, seperti di lahan basah atau tanah tergenang. Dalam kondisi oksidasi, vivianit dapat berubah menjadi strengit ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), yang lebih stabil tetapi memiliki kelarutan lebih rendah. Oleh karena itu, kontribusi vivianit sebagai sumber fosfor lebih optimal di lingkungan dengan

kondisi anaerob. Di berbagai daerah, terutama yang memiliki tingkat air tanah tinggi, keberadaan vivianit dapat menjadi indikator penting dalam studi geokimia tanah. Sebagai mineral sekunder, vivianit menunjukkan hubungan erat dengan aktivitas biologis di tanah, termasuk pengaruh mikroorganisme yang membantu proses dekomposisi bahan organik dan pelepasan fosfor terikat. Transformasi kimiawi dari vivianit menjadi strengit juga dapat memberikan wawasan tentang bagaimana perubahan kondisi lingkungan, seperti drainase atau aerasi, memengaruhi ketersediaan fosfor bagi tanaman. Selain itu, vivianit memiliki aplikasi potensial dalam restorasi lahan basah, di mana mineral ini dapat membantu dalam siklus ulang fosfor yang terakumulasi, mengurangi risiko eutrofikasi di badan air sekitarnya. Dengan demikian, studi lebih lanjut tentang vivianit dan mineral fosfat sekunder lainnya dapat membuka peluang untuk strategi pengelolaan fosfor yang lebih efektif di berbagai ekosistem tanah. Beberapa batuan dan sumber fosfat terlihat pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Batuan Fosfat Apatit
(Sumber : Bamiki dkk, 2021)

Fosfat lainnya yang ditemukan di dalam tanah mencakup berbagai bentuk aluminium fosfat (Al-fosfat) yang memiliki kontribusi unik terhadap dinamika fosfor di lingkungan tanah. Berlinite (AlPO_4) adalah salah satu mineral yang relatif umum

ditemukan pada tanah dengan reaksi masam. Berinit terbentuk sebagai hasil dari reaksi kompleks antara ion aluminium yang larut dan fosfat yang terlarut, terutama di tanah yang memiliki kandungan aluminium tinggi, seperti tanah laterit. Mineral lain dalam kelompok ini adalah varisit ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), yang memiliki struktur kimia yang lebih stabil dan cenderung terbentuk pada lingkungan dengan kelembapan tinggi. Selain itu, tanah tertentu juga dapat mengandung mineral fosfat langka seperti kalium-taranakit ($\text{H}_6\text{K}_3\text{Al}_5(\text{PO}_4)_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) dan amonium taranakit ($\text{H}_6(\text{NH}_4)_3\text{Al}_5(\text{PO}_4)_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$). Meskipun jarang, mineral ini memberikan wawasan penting tentang bagaimana unsur-unsur seperti kalium dan amonium dapat berinteraksi dengan fosfat di lingkungan tanah yang sangat masam. Sifat-sifat mineral ini menjadikannya relevan untuk penelitian tentang pengelolaan tanah masam, terutama dalam konteks peningkatan ketersediaan fosfor melalui manipulasi kimia tanah. Pengelolaan tanah yang memperhitungkan keberadaan mineral Al-fosfat dapat mencakup penggunaan bahan organik atau amelioran yang mampu mengikat aluminium, sehingga menurunkan kompetisi antara aluminium dan fosfor untuk membentuk senyawa yang tidak larut. Selain itu, pengembangan pupuk yang dirancang khusus untuk tanah masam dapat menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi serapan fosfor. Dengan pemahaman mendalam tentang mineral-mineral ini, para ilmuwan dapat menciptakan pendekatan baru yang lebih adaptif dalam mengelola tanah masam demi produksi tanaman yang optimal. Beberapa sumber unsur hara fosfat yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi bagi tanaman seperti pada Tabel 7.1.

Tabel 7. 1 Sumber Fosfat

No	Sumber Fosfat	Kandungan/Rumus Kimia	Keterangan
1	Calcium phosphates	CaHPO_4	Tidak Tersedia
2	Aluminium phosphate	AlPO_4	Tidak Tersedia
3	Iron phosphate	FePO_4	Tidak Tersedia
4	Phosphate	HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , PO_4^{3-}	Dapat digunakan dan tersedia untuk tanaman
5	Fluor apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	Tidak Tersedia
6	Vivianite	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tidak Tersedia
7	Phosphorit	-	Fosfat sedimenter (marin)
8	Organik P	-	Dapat digunakan dan tersedia untuk tanaman dan organisme
9	Guano Kelelawar	-	Dapat digunakan dan tersedia untuk tanaman dan organisme

(Sumber : Asril dkk, 2023)

Fosfat alam organik merupakan salah satu sumber fosfat dalam tanah yang terbentuk dari akumulasi bahan organik hasil ekskresi hewan, termasuk kelelawar dan burung. Kelelawar, sebagai contoh utama, menghasilkan guano, yaitu kotoran yang sangat kaya akan fosfat dan senyawa nitrogen. Proses pembentukan deposit ini berlangsung selama bertahun-tahun di tempat yang terlindung, seperti gua-gua. Di wilayah Indonesia, beberapa lokasi terkenal dengan deposit guano yang melimpah, termasuk gua-gua di Karangbolong,

wilayah selatan Yogyakarta, dan area sekitar Cirebon. Guano dari kelelawar memiliki nilai agronomis yang tinggi karena tidak hanya mengandung fosfat yang mudah larut, tetapi juga menyediakan unsur hara lain seperti kalium, magnesium, dan elemen mikro. Proses pengendapan guano melibatkan interaksi kompleks antara aktivitas biologis, faktor lingkungan seperti kelembaban dan suhu, serta dinamika mineralisasi yang mengubah bahan organik menjadi senyawa yang mudah diserap oleh tanaman. Dengan demikian, fosfat dari deposit guano ini menjadi sumber hara yang sangat penting dalam pengelolaan tanah dan tanaman di kawasan tropis. Sebaran sumber fosfat di beberapa wilayah Indonesia Tabel 7.2.

Tabel 7. 2 Wilayah Penghasil Pospat Alam

No	Propinsi	Potensi (ton)	Kadar P2O5 (%)
1	Jawa Barat (Kabupaten ciamis Kecamatan Sidomulih Desa Pamarican)	2.000.000	15-39
2	Jawa Barat (Kabupaten ciamis Kecamatan Padaherang Desa Padaherang)	425.000	18-33
3	Jawa tengah (Kabupaten Kebumen Kecamatan Ayah Desa Karangbolong, Gombang, Gua Banteng, Gebluk)	250.000	10-28, 119 gua fosfat
4	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Omben Desa Tambak)	3.000.000	23,26
5	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Sokobanah Desa Bira Timur)	2.250.000	43,14

No	Propinsi	Potensi (ton)	Kadar P2O5 (%)
6	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Sampang Desa Dalpenan)	4.500.000	9,79-27,78
7	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Jrengik Desa Buker)	1.500.000	29,01
8	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Jrengik Desa Taman)	1.500.000	4,19
9	Kalimantan Selatan (Kabupaten Tapin Kecamatan Bungur Desa Gua Ratau)	110.100	7,31-12,19
10	Aceh (Kabupaten Aceh Besar Kecamatan Arongan Lambalek Desa Gua Gleteumiba)	13.000	6,25-27,8 Gua Fosfat

(Sumber : Asril dkk, 2023)

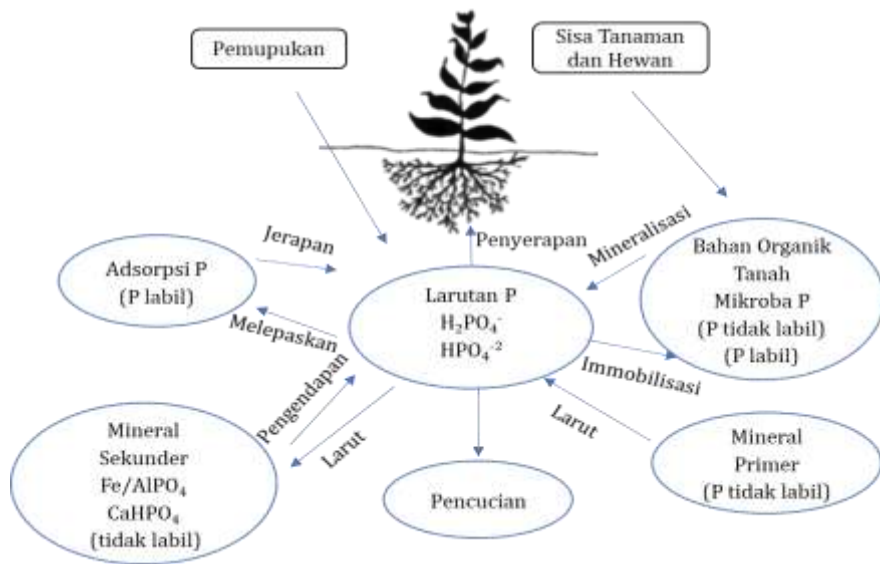
7.3 Transformasi Fosfor Dalam Tanah

Hubungan antara keragaman bentuk P dalam tanah dijelaskan pada Gambar 7.2. Berkurangnya P larutan tanah dengan serapan oleh akar tanaman disangga oleh fraksi P organik dan anorganik dalam tanah. Mineral P primer dan sekunder melarut kembali ke dalam larutan menjadi H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} tersedia. P anorganik dijerap dalam mineral dan permukaan liat sebagai H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} (P anorganik labil) dapat juga dilepaskan kembali pada penyangga P larutan. Mikroorganisme tanah mencerna residu tanaman mengandung P dan menghasilkan senyawa P organik yang dimineralisasi melalui aktivitas mikrobial untuk mensuplai P larutan.

Pupuk P larut-air diberikan ke tanah dengan mudah melarut dan meningkatkan P dalam larutan tanah. Di samping P diserap oleh akar, penyangga fraksi P organik dan anorganik meningkat dalam P larutan melalui jerapan P pada permukaan mineral, pengendapan atau presipitasi sebagai mineral P sekunder, dan immobilisasi sebagai mikrobial atau P organik. Mempertahankan konsentrasi P larutan (intensitas) untuk mencukupi hara P tergantung kemampuan P labil (kuantitas) untuk mengganti P larutan tanah yang diambil tanaman. Rasio faktor kuantitas ke faktor intensitas didefinisikan kapasitas penyangga (BC) atau relatif kemampuan tanah terhadap penyangga larutan P tanah. Kapasitas penyangga (BC) yang lebih besar, terbesar pada kemampuan menyangga larutan P. Siklus P dapat disederhanakan mengikuti hubungan :

Larutan P tanah $\leftarrow \rightarrow$ P Labil $\leftarrow \rightarrow$ P Tidak Labil

Dimana P labil dan nonlabil berada pada fraksi organik dan anorganik. P labil merupakan bagian yang mudah tersedia menjadi P larutan karena laju disosiasi yang tinggi atau berubah menjadi senyawa P-tidak labil karena adsorpsi atau retensi. Menipisnya persediaan P labil disebabkan oleh beberapa P non labil menjadi labil, tetapi pada laju yang lambat. Jadi faktor kuantitas terdiri dari fraksi P labil dan non labil. Pengertian dinamika transformasi P dalam tanah dibicarakan sebagai dasar untuk menduga pengelolaan tanah dan pupuk P untuk menjamin ketersediaan P yang cukup bagi tanaman.



Gambar 7. 2 Siklus Fosfor dalam Tanah
(Sumber : Mitran dkk, 2018)

7.4 Fraksi Fosfor dalam Tanah

Pada sebagian besar tanah, ketersediaan fosfor bagi tanaman dari larutan tanah pada satu waktu sangatlah terbatas, sering kali tidak lebih dari sekitar 0,01% dari total fosfor yang ada di tanah. Fosfor dalam tanah hadir dalam berbagai bentuk senyawa, sebagian besar tidak tersedia untuk tanaman. Fosfor tanah dibedakan menjadi dua bentuk utama, yaitu fosfor organik dan fosfor anorganik. Fosfor anorganik berasal dari mineral apatit, kompleks fosfat kalsium (Ca), besi (Fe), dan aluminium (Al), serta fosfor yang terjerap pada partikel lempung. Sementara itu, fosfor organik berasal dari sisa-sisa tanaman, hewan, dan mikroorganisme, yang terdiri dari senyawa seperti asam nukleat, fosfolipid, dan fitin. Kelarutan fosfor anorganik dan organik dalam tanah sangat rendah, sehingga jumlah fosfor dalam larutan tanah juga sangat terbatas (Munamawar, 2011). Secara umum, fosfor di dalam tanah ditemukan dalam tiga fraksi utama: (1) fraksi

fosfor larut, (2) fraksi fosfor labil, dan (3) fraksi fosfor non-labil. Fraksi larut dapat berubah menjadi fraksi labil dan non-labil, yang menyebabkan ketersediaannya menurun. Sebaliknya, fosfor dari fraksi non-labil dapat berubah menjadi fraksi labil dan larut, sehingga lebih mudah tersedia untuk tanaman (Leiwakabessy et al., 2003).

Fosfor anorganik dalam tanah terbagi menjadi dua bentuk utama, yaitu fosfor dalam larutan dan fosfor dalam fase padatan, yang diklasifikasikan ke dalam tiga kategori: (1) bentuk yang tersedia dengan cepat untuk tanaman; (2) bentuk yang tersedia secara lambat; dan (3) bentuk yang tidak berinteraksi langsung dengan fosfor larutan (Widjaja dan Sudjadi, 1987). Proses perubahan dari fosfor larutan menjadi fosfor labil berlangsung dengan cepat melalui proses adsorpsi dan disebut sebagai fosfor terserap, yaitu bentuk yang mudah mencapai keseimbangan dengan fosfor larutan. Perubahan fosfor labil menjadi fosfor metastabil, serta fosfor metastabil menjadi fosfor stabil, berlangsung lebih lambat dan terkait dengan proses fiksasi fosfor. Fosfor stabil termasuk dalam kategori yang lambat untuk mencapai keseimbangan dengan fosfor larutan. Metode fraksionasi bertahap sering digunakan untuk mengelompokkan fosfor dalam tanah menjadi tiga fraksi utama, yaitu fosfor labil, metastabil, dan stabil.

Fosfor organik terdapat dalam humus dan bahan organik tanah lainnya, seperti pupuk hijau, pupuk kandang, dan sisa tanaman. Fosfor yang terikat pada bahan organik akan mengalami pelapukan, menghasilkan senyawa seperti inositol fosfat, asam nukleat, dan fosfolipid. Lapisan atas tanah mengandung fosfor organik dalam jumlah tinggi (20-50% dari total fosfor), sedangkan kandungan ini menurun di lapisan tanah yang lebih dalam (Sanchez, 1992). Menurut Foth (1998), bentuk fosfor organik dalam tanah serupa dengan yang ditemukan pada tanaman. Kandungan fosfor organik lebih banyak ditemukan di lapisan tanah atas dan cenderung meningkat seiring bertambahnya umur tanaman. Namun,

proses dekomposisi atau mineralisasi dapat mengurangi jumlah fosfor organik, meskipun proses ini menghasilkan fosfor yang tersedia bagi tanaman. Mineralisasi fosfor organik dapat dipercepat jika tanah tidak terlindungi.

Secara umum, semua bentuk fosfor ditemukan di berbagai jenis tanah. Pada tanah masam, Al-P dan Fe-P adalah yang paling dominan, sementara Ca-P lebih umum pada tanah dengan pH netral hingga alkali. Pada tanah masam, ion Al^{3+} , Fe^{2+} , dan Mn^{2+} baik dalam bentuk larut maupun tidak larut dapat dipertukarkan, sehingga fosfor terjerap pada kompleks jerapan menjadikan fosfor yang terikat dengan cara ini masih dapat dimanfaatkan oleh tanaman.

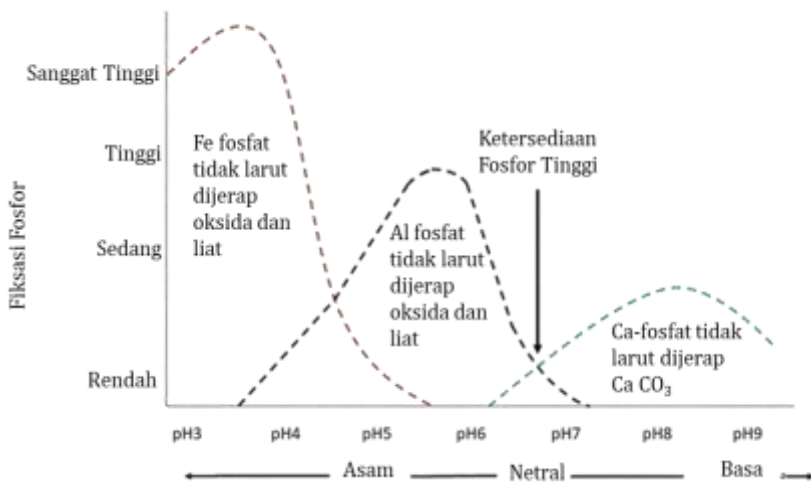
7.4.1 P-Anorganik

Kandungan P anorganik dalam tanah hamper selalu lebih besar dari P organik, kecuali pada tanah-tanah organik. P organik dimineralisasi menjadi P anorganik, atau sumber P lain yang ditambahkan ke dalam tanah. P anorganik dalam larutan yang tidak diserap oleh akar atau diimobilisasi oleh mikroorganisme dapat dijerap (*diabsorbed*) oleh permukaan mineral (menjadi P labil) atau diendapkan (*precipitated*). Sebagai senyawa P sekunder, jerapan permukaan dan reaksi presipitasi secara umum disebut fiksasi P atau retensi P. Fiksasi P anorganik tergantung pada banyak faktor, yang terpenting adalah kandungan dan perilaku P tanah.

Pada dasarnya P anorganik dapat digolongkan berdasarkan sifat fisik, kimia, mineralisasi maupun kombinasinya. Fosfor anorganik di dalam tanah terdapat sebagai kombinasi dengan mineral primer seperti apatit dan mineral sekunder seperti ion fosfat yang dipegang secara stabil oleh liat, besi, aluminium hidroksida, kalsium dan magnesium. Bentuk sekunder tersebut dikatakan sebagai P yang terfiksasi. Bentuk P anorganik umumnya dibagi menjadi tiga fraksi aktif dan dua fraksi

tidak aktif. Fraksi aktif dapat dikelompokkan menjadi Ca-P, Al-P dan Fe-P. fraksi tidak aktif adalah bentuk P-terselebung dan P-larutan dalam keadaan tereduksi.

Senyawa P terselebung terdiri dari Fe-P dan Al-P yang dikelilingi oleh suatu lapisan dari bahan lain yang mencegah reaksi dari P tersebut dengan larutan tanah. Bentuk P-larut dalam keadaan tereduksi ditutupi oleh suatu lapisan yang Sebagian atau seluruhnya dapat dihancurkan dibawah kondisi anaerobik. Penyebaran bagian bentuk P anorganik dalam tanah dikendalikan oleh aktifitas berbagai ion dalam tanah yaitu pH tanah, umur tanaman, drainase dan mineral alam serta derajat pelapukan tanah. Pada Gambar 7.3 memperlihatkan perilaku fiksasi P berdasarkan pengaruh pH tanah.



Gambar 7.3 Pengaruh pH tanah Terhadap Jerapan dan Presipitasi P

(Sumber: Peen and james 2019)

Pada tanah masam, P anorganik diendapkan sebagai mineral sekunder besi atau aluminium fosfat (Fe/Al-P) dan atau dijerap permukaan oksida besi atau aluminium dan mineral liat. Pada tanah yang bereaksi netral dan

berkapur, P anorganik dipresipitasi sebagai mineral sekunder Ca-P dan Mg-P pada tanah yang kaya Mg dan atau dijerap pada permukaan liat dan CaCO_3 .

Retensi P merupakan rangkaian dari presipitasi dan jerapan. Jika konsentrasi larutan P rendah, akan didominasi oleh adsorpsi (jerapan), reaksi presipitasi berproses jika P larutan melebihi hasil kelarutannya (K_{sp}) dari mineral yang spesifik mengandung P. Dimana pupuk larut air digunakan, konsentrasi larutan P tanah meningkat lebih besar tergantung pada metode aplikasi dan dosis P (baris x sebar). Kedua reaksi jerapan dan presipitasi dihasilkan, pada beberapa peningkatan dengan segera mengikuti penambahan pupuk P. Reaksi presipitasi P terjadi seperti larutan P melampaui kelarutan mineral yang spesifik, walaupun terjadi jerapan jika kapasitas jerapan tidak dienuhi P. Tanpa memperhatikan sumbangan dari jerapan dan presipitasi, pengertian proses fiksasi P penting untuk pengelolaan efisiensi pupuk P dan hara P optimum.

Fosfor anorganik di tanah juga dikenal memiliki mobilitas yang sangat rendah, sehingga distribusinya dalam tanah menjadi terbatas. Dalam konteks agroekosistem, terdapat dua mekanisme utama yang berperan dalam mengendalikan konsentrasi fosfor di larutan tanah dan pergerakannya, yaitu kelarutan mineral yang mengandung fosfor serta adsorpsi atau fiksasi ion fosfat pada permukaan partikel tanah. Kedua proses ini berperan penting dalam menentukan ketersediaan fosfor bagi tanaman, tetapi di lapangan sering kali sulit untuk memisahkan pengaruh masing-masing atau bahkan untuk memahami sifat spesifik senyawa fosfor anorganik yang terdapat di tanah tertentu. Kelarutan mineral yang mengandung fosfor sangat dipengaruhi oleh kondisi kimia tanah, seperti pH,

kandungan ion lain di larutan tanah, serta suhu. Dalam tanah masam, misalnya, fosfor cenderung membentuk senyawa yang kurang larut bersama aluminium (Al) atau besi (Fe), sementara pada tanah alkalis, fosfor sering berikatan dengan kalsium (Ca) membentuk senyawa yang juga tidak mudah larut. Fenomena ini menjelaskan mengapa fosfor sering kali menjadi unsur hara yang terbatas meskipun jumlah totalnya di tanah bisa relatif besar. Selain itu, keberadaan ion lain di larutan tanah dapat berkompetisi dengan ion fosfat untuk berinteraksi dengan partikel tanah, sehingga turut memengaruhi kelarutan fosfor.

Mineral apatit, yang termasuk dalam kelompok senyawa kalsium yang mengandung fosfor, merupakan salah satu mineral dengan tingkat kelarutan paling rendah. Hal ini menjadikannya sumber fosfor yang paling sulit diakses oleh tanaman. Beberapa jenis apatit, seperti fluorapatit, memiliki sifat sangat tidak larut sehingga tetap ada bahkan di tanah yang sudah mengalami pelapukan berat, termasuk tanah asam. Di sisi lain, senyawa kalsium fosfat yang lebih sederhana, seperti monokalsium fosfat dan dikalsium fosfat, cenderung lebih mudah larut dan tersedia bagi tanaman. Namun, pada kondisi tanah yang tidak baru saja dipupuk, senyawa-senyawa ini biasanya ditemukan dalam jumlah sangat kecil karena cenderung dengan cepat berubah kembali menjadi bentuk yang lebih tidak larut (Weil dan Brady, 2017).

Fluorapatit, yang dikenal sebagai salah satu jenis apatit dengan kelarutan paling rendah, biasanya berasal dari mineral primer yang ditemukan dalam tanah, terutama pada lapisan bawah atau horison bawah tanah yang telah mengalami proses pelapukan. Sifatnya yang sangat tidak larut ini menjadi indikator mengapa fosfor yang terkandung di dalamnya sulit tersedia bagi tanaman.

Senyawa fosfat sederhana seperti monokalsium fosfat dan dikalsium fosfat lebih mudah larut dan, oleh karena itu, lebih mudah dimanfaatkan oleh tanaman. Namun demikian, ketersediaannya terbatas, terutama pada tanah yang tidak baru saja dipupuk, karena senyawa-senyawa ini dengan cepat mengalami transformasi kembali menjadi bentuk yang kurang larut dan sulit diakses (Buckman dan Brady, 2018). Pada Tabel 7.3 menunjukan beberapa mineral P yang biasa ditemukan pada tanah masam, netral dan tanah berkapur.

Tabel 7. 3 Mineral P yang Biasa Ditemukan pada Tanah Masam, Netral dan Tanah Berkapur

Tanah masam	
Varisit	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Strengit	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Tanah netral dan berkapur	
Dikalsium fosfat dihidrat (DCPD)	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Dikalsium fosfat (DCP)	CaHPO_4
Oktakalsium fosfat (OCP)	$\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$
b-Trikalsium fosfat (b-TCP)	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
Hidroksiapatit (FA)	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$
Flour apatit (FA)	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$

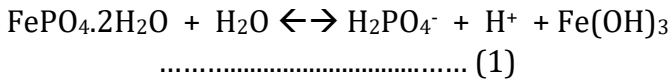
Dinamika kelarutan mineral fosfor dalam tanah menunjukkan bahwa jenis mineral fosfor yang ada sangat menentukan tingkat ketersediaannya. Mineral seperti apatit, khususnya fluorapatit, menjadi contoh bagaimana keterbatasan kelarutan dapat menghambat pemanfaatan fosfor oleh tanaman. Sebaliknya, senyawa fosfat yang lebih sederhana memiliki potensi lebih tinggi untuk mendukung pertumbuhan tanaman, meskipun keberadaannya di tanah sering kali sangat terbatas. Hal ini menegaskan pentingnya pengelolaan pupuk fosfat secara bijak, termasuk memilih jenis pupuk yang sesuai dengan kebutuhan tanaman dan kondisi tanah, guna

meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor dan memastikan ketersediaannya bagi tanaman.

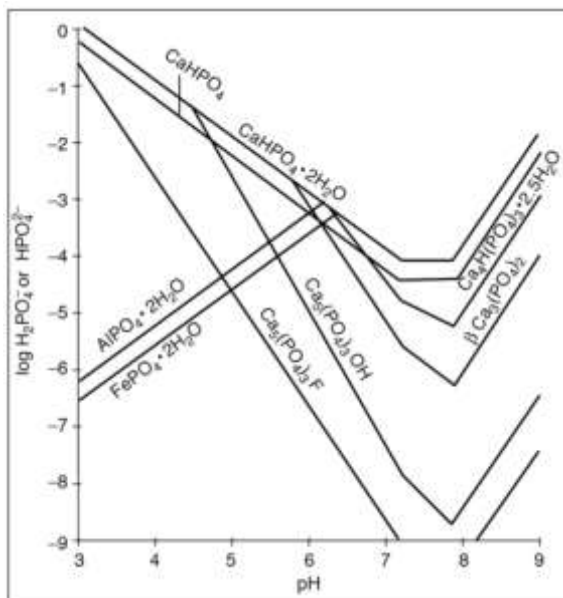
Berbeda dengan kalsium fosfat, mineral seperti besi hidroksi fosfat dan aluminium hidroksi fosfat, yaitu strengite ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan variscite ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), memiliki kelarutan yang sangat rendah pada tanah yang sangat masam. Kelarutan mineral-mineral ini meningkat seiring dengan kenaikan pH tanah. Akibatnya, pada tanah alkalis, mineral ini menjadi tidak stabil dan lebih mudah larut. Sebaliknya, di tanah asam, mereka tetap stabil dalam kondisi tidak larut, sehingga ketersediaan fosfor dari senyawa ini menjadi sangat terbatas. Selain itu, tanah asam juga sering mengandung senyawa serupa lainnya yang mengombinasikan fosfor dengan besi, aluminium, atau mangan. Senyawa-senyawa ini sebagian besar terbentuk melalui reaksi permukaan antara ion fosfat dengan polimer hidroksi amorf yang sering ditemukan sebagai pelapis partikel tanah. Penelitian menunjukkan bahwa ion fosfat dapat bereaksi dengan aluminium di sekitar tepi kristal mineral tanah liat silikat. Interaksi ini menghasilkan produk yang tidak larut, mirip dengan aluminium fosfat yang disebutkan sebelumnya (Weil dan Brady, 2017).

Siklus P menggambarkan tingkat larutan P disangga oleh P yang dijerap pada permukaan mineral (P labil), mineralisasi P organik dan mineral P larut. Akhirnya, konsentrasi P larutan dikendalikan oleh kelarutan mineral P. Biasanya sebagian besar mineral P ditemukan pada tanah masam. Mineral Al-P dan Fe-P, sedangkan mineral Ca-P lebih dominan pada tanah netral dan berkapur. Adanya kelarutan mineral konsentrasi ion dipertahankan dalam larutan tanah oleh mineral yang spesifik. Setiap mineral P akan menyokong konsentrasi ion spesifik tergantung pada hasil kelarutan (K_{sp}) dari mineral.

Contoh : $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ akan melarut sebagai berikut :



Seperti H_2PO_4^- menurun dengan penyerapan P, strengit larut kemudian mensuplai kembali atau mempertahankan konsentrasi H_2PO_4^- . Reaksi ini juga menunjukkan peningkatan H^+ (menurunkan pH), menurunkan H_2PO_4^- . Dengan demikian, adanya mineral P spesifik dalam tanah dan konsentrasi larutan P disokong oleh mineral ini tergantung pada pH larutan.



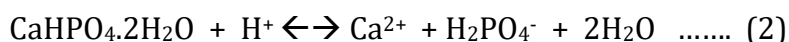
Gambar 7. 4 Kelarutan Mineral Ca, Al dan Fe Fosfat dalam Tanah

(Sumber : Currie dkk 2017)

Hubungan antara kelarutan dari mineral P biasa dan pH larutan ditunjukkan pada gambar 7.4. Sumbu Y menunjukkan konsentrasi H_2PO_4^- atau HPO_4^{2-} dalam tanah. Ion H_2PO_4^- lebih dominan pada pH , 7,2, sementara HPO_4^{2-} lebih dominan pada pH > 7,2 . Sumbu X

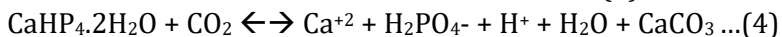
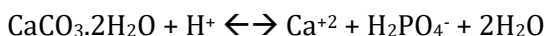
menunjukkan pH larutan. pada pH 4,5, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ mengendalikan konsentrasi H_2PO_4^- dalam larutan. Meningkatnya pH meningkatkan konsentrasi H_2PO_4^- karena mineral Al-P dan atau Fe-P larut menurut pada persamaan 1, yang mana jika digambarkan dalam diagram sebagai positif garis miring. Meningkatnya ketersediaan P sering diamati jika flourapatit dapat digunakan sebagai pupuk pada pH tanah rendah (pH 4,5), sebagaimana ditunjukkan oleh kelarutannya yang tinggi pada pH rendah. Perbedaannya, hidroksiapatit atau feroapatit tidak dapat digunakan untuk menyediakan P tersedia bagi tanaman pada tanah netral atau berkapur karena kelarutannya rendah.

Peningkatan pH, garis kelarutan varisit dan strengit memotong beberapa garis, menunjukkan kelarutan mineral Ca-P. Untuk contoh : pada pH 4,8, kedua bentuk strengit dan fluoroapatit dapat berada dalam tanah, menyumbang 10-4,5 M H_2PO_4^- dalam larutan. Antara pH 6,0 dan 6,5 mineral Al-P dan Fe-P dapat bersamaan dengan b-trikalsium fosfat (b-TCP), oktakalsium fosfat (OCP), dikalsium fosfat (DCP), dan dikalsium fosfat dihidrat (DCPD) kira-kira 10-3,2 M H_2PO_4^- , yang mana diperkirakan konsentrasi larutan tertinggi ada pada sebagian tanah-tanah yang tidak dipupuk. Kelarutan mineral Ca-P dipengaruhi oleh banyak perbedaan daripada mineral-mineral Al-P dan Fe-P, sebagaimana ditunjukkan oleh garis miring Ca-P, digambarkan mengikuti persamaan untuk DCPD :



Contoh, diperkirakan tanah mengandung b-TSP pada pH 7,0. Jika pH menurun, H_2PO_4^- meningkat sampai ~ pH 6,0 seperti b-TCP larut. Jika pH < 6,0 strengit dan atau varisit akan diendapkan dan H_2PO_4^- berkurang. Garis Ca-P

merubah kemiringan pada pH 7,2 karena H_2PO_4^- lebih dominan dalam larutan dibandingkan dengan HPO_4^{2-} . Garis kelarutan CA-P hanya da HPO_4^{2-} pada pH > 7,2. Di atas pH 7,8, garis kelarutan Ca-P menunjukkan kemiringan positif berarti bahwa apabila pH naik di atas 7,8; konsentrasi HPO_4^{2-} meningkat. Perubahan kelarutan menyebabkan persaingan reaksi jelarutan CaCO_3 sebagai berikut:



Pada persamaan (4) pengendapan CaCO_3 terjadi pada pH $\geq 7,8$. Ca-larutan akan berkurang dengan terjadinya presipitasi CaCO_3 di dalam tanah (Persamaan 3). DCPD akan larut (persamaan 2) dan menyediakan kembali Ca^{+2} larutan. Jika DCPD larut, H_2PO_4^- meningkat (persamaan 4) yang dihitung dari persamaan 2 dan 3. Semua mineral Ca-P berperilaku sama di dalam tanah berkapur. Dalam hal ini, hubungan kelarutan P menunjukkan peningkatan konsentrasi P larutan di atas pH 7,8, ketersediaan P tanaman actual menurun. Pelepasan H_2PO_4^- ke dalam larutan karena kelarutan mineral Ca-P akan menjerap Ca ke pengendapan CaCO_3 .

7.4.2 P-Organik

Fosfor organik menyumbang sekitar 50% dari total fosfor yang ada di dalam tanah, dengan variasi antara 15% hingga 80% di sebagian besar jenis tanah. Kandungan bahan organik tanah cenderung menurun seiring bertambahnya kedalaman, dan distribusinya juga bervariasi tergantung pada jenis tanah. Persentase fosfor dalam bahan organik tanah berkisar antara 1% hingga 3%. Banyak senyawa organik yang terdapat di dalam

tanah belum sepenuhnya terkarakterisasi. Sebagian besar bahan organik tanah terdiri dari ester asam ortofosfat (H_2PO_4^-) dan umumnya diidentifikasi sebagai fosfat inositol, fosfat lipid, dan asam nukleat (Havlin et al. 1993). Perkiraan proporsi senyawa-senyawa tersebut dalam total fosfor organik adalah sebagai berikut: fosfat inositol 10–50%, fosfat lipid 1–5%, dan asam nukleat 0,2–2,5%.

Tiga kelompok utama senyawa fosfor organik yang umum ditemukan di tanah adalah: (1) fosfat inositol, yang merupakan mono-ester fosfat dari senyawa mirip gula, inositol [$\text{C}_6\text{H}_6(\text{OH})_6$]; (2) di-ester fosfat, seperti yang terdapat dalam asam nukleat dari DNA dan RNA; dan (3) fosfolipid, yang sebagian besar berasal dari mikroba dan membran sel tumbuhan. Meskipun ada senyawa fosfor organik lainnya di tanah, identitasnya belum sepenuhnya dipahami dan jumlahnya relatif kecil (Weil dan Brady 2017). Terdapat tiga kategori utama senyawa fosfor organik yang ditemukan baik di dalam tumbuhan maupun di tanah, yaitu: 1) fitin dan turunannya; 2) asam nukleat; dan 3) fosfolipid. Di antara senyawa-senyawa tersebut, inositol fosfat adalah yang paling melimpah.

Inositol fosfat merupakan senyawa fosfor organik yang paling melimpah, menyumbang antara 10% hingga 60% dari total fosfor organik yang terdapat di dalam tanah. Keberadaannya yang melimpah ini mungkin disebabkan oleh stabilitas yang tinggi dalam berbagai kondisi pH, baik asam maupun basa, serta kepadatan muatan yang tinggi. Hal ini memungkinkan inositol fosfat untuk berinteraksi dengan humus tanah dan permukaan mineral secara efisien. Salah satu bentuk inositol fosfat yang paling umum ditemukan di tanah adalah asam fitat, yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan fosfor dalam biji-bijian, termasuk pada tanaman seperti jagung (Weil dan Brady 2017). Inositol fosfat terdiri dari serangkaian

ester fosfat yang bervariasi dari monofosfat hingga heksafosfat, dengan asam fitat (myo-inositol heksafosfat) memiliki enam kelompok ortofosfat (H_2PO_4^-) yang terikat pada setiap atom karbon dalam cincin benzen.

Asam fitat adalah senyawa penting dalam penyimpanan fosfor, terutama dalam biji-bijian. Dalam struktur asam fitat, penggantian berturut-turut dari H_2PO_4^- dengan OH^- menghasilkan lima ester fosfat lainnya. Sebagai contoh, penta-fosfat adalah ester fosfat yang paling umum dan menyumbang sekitar 50% dari total fosfor organik di dalam tanah (Havlin et al. 1993). Sebagian besar inositol fosfat di tanah adalah hasil dari aktivitas mikroba dan dekomposisi sisa-sisa tanaman. Proses ini menunjukkan bagaimana interaksi antara organisme hidup dan bahan organik dapat mempengaruhi ketersediaan fosfor di dalam ekosistem tanah.

Keberadaan inositol fosfat sangat penting bagi pertumbuhan tanaman karena menyediakan sumber fosfor yang dapat digunakan saat tanaman membutuhkan nutrisi tersebut. Dalam proses pertumbuhan, tanaman akan mengandalkan cadangan fosfor yang disimpan dalam bentuk asam fitat. Ketika biji berkecambah, enzim fitase akan menghidrolisis asam fitat menjadi inositol dan fosfat bebas, sehingga memudahkan tanaman untuk menyerap nutrisi yang diperlukan untuk perkembangan awalnya. Tanpa adanya aktivitas fitase, mineral dan unsur nutrisi lain yang terikat pada asam fitat tidak dapat diserap secara efektif oleh tanaman. Meskipun inositol fosfat memiliki peran penting dalam siklus nutrisi tanah, beberapa senyawa fosfor organik lainnya juga ditemukan di lingkungan tersebut. Namun, identitas dan fungsi senyawa-senyawa ini masih kurang dipahami dibandingkan dengan inositol fosfat.

Asam nukleat terdapat di seluruh sel hidup dan dihasilkan selama proses dekomposisi sisa-sisa bahan organik oleh mikroorganisme tanah. Terdapat dua jenis asam nukleat yang berbeda, yaitu asam ribonukleat (RNA) dan asam deoksiribonukleat (DNA), yang dilepaskan ke dalam tanah dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan inositol fosfat, meskipun keduanya dihancurkan dengan lebih cepat. Meskipun asam nukleat memiliki peran penting, mereka hanya menyumbang sebagian kecil dari total fosfor organik dalam tanah, yaitu sekitar 2,5% atau bahkan kurang. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun asam nukleat berfungsi sebagai komponen vital dalam kehidupan seluler, kontribusinya terhadap ketersediaan fosfor di dalam tanah relatif terbatas.

Selain asam nukleat, senyawa fosfor organik lainnya yang ditemukan di tanah adalah fosfolipid. Berbeda dengan asam nukleat, fosfolipid tidak larut dalam air tetapi dapat dengan mudah digunakan dan disintesis oleh mikroorganisme tanah. Beberapa fosfolipid yang umum adalah turunan dari gliserol. Kecepatan pelepasan fosfolipid dari bahan organik di dalam tanah cukup tinggi, sehingga kandungan fosfolipid di dalam tanah juga tergolong rendah, sekitar 5% atau kurang dari total fosfor organik (Havlin et al. 1993). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun fosfolipid memiliki potensi untuk berkontribusi terhadap ketersediaan fosfor, jumlahnya yang terbatas memerlukan perhatian lebih lanjut dalam konteks pengelolaan kesuburan tanah.

Proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tidak hanya menghasilkan asam nukleat dan fosfolipid tetapi juga mempengaruhi siklus nutrisi secara keseluruhan. Mikroorganisme berperan penting dalam mengubah senyawa kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan tersedia bagi tanaman. Dengan

demikian, pemahaman tentang interaksi antara mikroorganisme dan senyawa organik sangat penting untuk meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor di dalam tanah. Selain itu, proses ini juga berkontribusi pada pembentukan humus yang memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas retensi air, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman.

7.4 Faktor yang Memengaruhi Fosfor dalam Tanah

Sifat fisik dan kimia tanah memiliki peran penting dalam menentukan kelarutan fosfor (P) di dalam tanah. Kelarutan fosfor sangat dipengaruhi oleh berbagai reaksi kimia, seperti adsorpsi dan desorpsi, yang terjadi di antara partikel tanah. Faktor-faktor ini juga berdampak pada konsentrasi fosfor dalam larutan tanah, yang pada akhirnya menentukan tingkat ketersediaan fosfor bagi tanaman. Ketersediaan ini sangat penting karena fosfor merupakan salah satu unsur hara esensial yang mendukung pertumbuhan tanaman, terutama dalam pembentukan energi, struktur sel, dan transfer genetik. Selain itu, sifat-sifat tanah juga memengaruhi efisiensi penggunaan pupuk fosfor, yang menjadi salah satu strategi utama untuk memperbaiki kandungan fosfor di tanah yang kurang subur.

1. Peran Mineral Tanah

Mineral tanah adalah salah satu komponen yang berkontribusi besar terhadap kelarutan dan ketersediaan fosfor. Mineral primer seperti apatit sering menjadi sumber utama fosfor di tanah, sedangkan mineral sekunder seperti oksida besi dan aluminium dapat bertindak sebagai penyerap fosfor. Kehadiran mineral-mineral ini dapat mengikat fosfor dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman, terutama pada tanah yang bersifat masam. Di sisi lain, proses pelapukan mineral dapat melepaskan fosfor ke dalam larutan tanah,

meningkatkan konsentrasi fosfor larutan yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman.

2. Pengaruh pH Tanah

pH tanah merupakan faktor kunci yang memengaruhi kelarutan fosfor. Pada tanah masam, fosfor cenderung bereaksi dengan ion-ion aluminium (Al^{3+}) dan besi (Fe^{3+}), membentuk senyawa yang sulit larut. Sebaliknya, pada tanah alkalis, fosfor sering berikatan dengan ion kalsium (Ca^{2+}), juga membentuk senyawa yang tidak mudah tersedia bagi tanaman. Ketersediaan fosfor optimal biasanya ditemukan pada pH tanah netral hingga sedikit masam (pH 6–7). Oleh karena itu, pengelolaan pH tanah menjadi strategi penting dalam memastikan fosfor tersedia secara maksimal bagi tanaman.

3. Dampak Ion Kation dan Anion

Ion-ion kation dan anion di dalam tanah dapat memengaruhi reaksi fosfor melalui kompetisi adsorpsi atau pembentukan senyawa tertentu. Kation seperti aluminium, besi, dan kalsium, memiliki afinitas tinggi untuk mengikat fosfor, sedangkan anion seperti sulfat (SO_4^{2-}) dan karbonat (CO_3^{2-}) dapat bersaing dengan fosfat untuk tempat adsorpsi pada partikel tanah. Interaksi ini memengaruhi jumlah fosfor yang tersedia di larutan tanah. Pengelolaan ion-ion ini menjadi penting, terutama pada tanah yang memiliki kandungan ion kation atau anion yang tinggi.

4. Peran Bahan Organik

Bahan organik tanah berkontribusi terhadap kelarutan fosfor dengan berbagai cara. Senyawa organik yang dihasilkan dari dekomposisi bahan organik dapat membentuk kompleks dengan ion aluminium dan besi, sehingga mencegah ion-ion ini mengikat fosfor. Selain itu, bahan organik dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, yang pada gilirannya membantu

melepaskan fosfor dari senyawa-senyawa yang terikat erat. Oleh karena itu, pengelolaan bahan organik tanah tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah secara keseluruhan tetapi juga membantu meningkatkan ketersediaan fosfor bagi tanaman.

5. Pengaruh Waktu dan Suhu

Ketersediaan fosfor di tanah juga sangat dipengaruhi oleh waktu dan suhu. Proses adsorpsi dan desorpsi fosfor membutuhkan waktu untuk mencapai keseimbangan. Pada suhu yang lebih tinggi, aktivitas kimia dan biologis di dalam tanah meningkat, yang dapat mempercepat pelepasan fosfor dari bentuk yang tidak larut. Namun, suhu yang terlalu tinggi juga dapat meningkatkan laju pelapukan bahan organik, yang justru dapat mengurangi kandungan fosfor. Oleh karena itu, pemahaman tentang dinamika waktu dan suhu sangat penting dalam pengelolaan fosfor di lahan pertanian.

6. Efek Penggenangan

Kondisi penggenangan, seperti yang terjadi pada lahan sawah, dapat memengaruhi kelarutan fosfor dengan cara mengubah kondisi redoks tanah. Pada tanah yang tergenang, oksida besi yang mengikat fosfor dapat tereduksi menjadi bentuk larut, sehingga melepaskan fosfor ke dalam larutan tanah. Namun, jika penggenangan berlangsung terlalu lama, fosfor dapat hilang melalui proses pencucian. Oleh karena itu, pengelolaan air di lahan pertanian tergenang menjadi aspek penting dalam memaksimalkan ketersediaan fosfor.

7. Strategi Pengelolaan Pupuk Fosfor

Pengelolaan pupuk fosfor yang efektif sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor di tanah. Pemilihan jenis pupuk fosfor, dosis yang tepat, dan metode aplikasi yang sesuai dapat mengoptimalkan penyerapan fosfor oleh tanaman. Misalnya, aplikasi pupuk fosfor secara bertahap atau

pemberian pupuk di dekat zona akar tanaman dapat mengurangi risiko kehilangan fosfor akibat adsorpsi atau pencucian. Dengan pengelolaan yang baik, keberlanjutan ketersediaan fosfor di tanah dapat dipertahankan, sehingga mendukung produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asril, M., Widya, L., Basuki, Sanjaya, M.F., Refa, F., Baso, M., Sri, S., Monica, K. S., Maria, P., Wiwin, R. K., 2023. Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan. Medan. Yayasan Kita Menulis.
- Bamiki, R. E., Otmane, R., Ouabid, M., Abdellatif, E., Oussama, K.Y., and Jean, L. B. 2021. Phosphate Rocks: A Review of Sedimentary and Igneous Occurrences in Morocco. Minerals 2021, 11, 1137.<https://doi.org/10.3390/min11101137>.
- Barber SA. 1984. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. New York: John Willey and Sons.
- Buckman, H.O., and Brady, N.C. 2018. The Nature and Properties of Soil. Jakarta: PT Bhatara Karya Aksara.
- Currie, S.J., Christine, M., Van, Z., and Jacob, F. B. 2017. Utilizing Wetlands for Phosphorus Reduction in Great Lakes Watersheds: A Review of Available Literature Examining Soil Properties and Phosphorus Removal Efficiency. Great Lakes Restoration Initiative (GLRI). U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC)
- Foth. 1998. Dasar-dasar Ilmu Tanah. Edisi keenam. Jakarta. Erlangga
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., and Nelson, W.L. 1993. Soil Fertility and Fertilizers an Introduction to Nutrient Management. 6 edition. New Jersey: PrenticeHall, Inc.
- Leiwakabessy, F.M, Wahjudin, U.M, dan Suwarno. 2003. Kesuburan Tanah. Departemen Ilmu Tanah. Fakultas Pertanian. IPB. Bogor.

- Mitran, T., Ram, S. M., Rattan, L., Jayanta, L., Sandeep, K., and Rahul, D. 2018. Role of Soil Phosphorus on Legume Production. Legumes for Soil Health and Sustainable Management. https://DOI: 10.1007/978-981-13-0253-4_15.
- Munawar A. 2011. Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman. Bogor: IPB Pr.
- Penn, C.J., and James, J.C. 2019. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH A ects Phosphorus Availability to Plants. Agriculture 2019, 9, 120; <https://doi:10.3390/agriculture9060120www>
- Sanchez, P.A. 1992. Sifat dan Pengelolaan Tanah Tropika. Jilid 1. ITB Pr. Bandung.
- Weil, R.R., and Brady, N.C. 2017. The Nature and Properties of Soils. 15 th Ed. England: Persson Education Limited.
- Widjaja, A.I.P.G., dan M. Sudjadi. 1987. Status kelakuan Fosfat tanah-tanah di Indonesia. Prosiding Lokakarya Nasional Penggunaan Pupuk Fosfat. Bogor: Puslittan.
- Widjaya, A.P.G dan Sudjadi. M. 1987. Setatus dan kelakuan fosfat tanah-tanah di Indonesia. Prosiding Lokakarya Nasional Penggunaan Pupuk Fosfat. Pusat Penelitian Tanah Departemen Pertanian, Jakarta.

BAB 8

UNSUR KALIUM DALAM TANAH

Oleh Ida Ayu Suci

Kalium (K) merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang sangat penting bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Unsur ini berperan dalam berbagai proses fisiologis, seperti fotosintesis, transpor nutrisi, sintesis protein, serta regulasi keseimbangan air dalam tanaman. Kekurangan kalium dalam tanah dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanaman, sementara kelebihan kalium yang tidak dikelola dengan baik dapat berdampak pada ketidakseimbangan hara dalam tanah.

Kalium dalam tanah umumnya berasal dari mineral primer seperti feldspar dan mika, yang mengalami pelapukan seiring waktu. Selain itu, pupuk kalium juga menjadi salah satu sumber utama untuk meningkatkan ketersediaan unsur ini dalam tanah pertanian. Namun, efisiensi pemupukan kalium sering kali dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia tanah, serta interaksi dengan unsur hara lainnya. Faktor-faktor seperti kapasitas tukar kation (KTK), kadar bahan organik, tekstur tanah, dan pH tanah sangat menentukan seberapa banyak kalium yang tersedia bagi tanaman.

Beberapa jenis tanah, seperti tanah lempung berliat dan tanah vulkanik, umumnya memiliki kandungan kalium yang tinggi tetapi dalam bentuk yang tidak mudah tersedia bagi tanaman. Sebaliknya, tanah berpasir cenderung memiliki kandungan kalium yang lebih rendah karena mudah tercuci akibat curah hujan atau irigasi yang berlebihan. Oleh karena

itu, penting untuk memahami bagaimana bentuk-bentuk kalium dalam tanah dapat dimobilisasi agar tanaman dapat menyerapnya secara optimal.

Dalam sistem pertanian modern, strategi pengelolaan kalium tidak hanya bergantung pada aplikasi pupuk anorganik, tetapi juga melibatkan praktik konservasi tanah, rotasi tanaman, dan pemanfaatan bahan organik seperti kompos dan pupuk hijau. Kombinasi antara teknik ini dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan kalium sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem tanah. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa penggunaan zeolit sebagai pembawa kalium dapat memperlambat pelepasan unsur ini ke dalam tanah, sehingga meningkatkan efisiensi serapan oleh tanaman.

Dengan semakin meningkatnya tuntutan terhadap produktivitas pertanian serta keberlanjutan lingkungan, studi mengenai ketersediaan, mobilitas, serta efisiensi pemanfaatan kalium dalam tanah menjadi semakin penting. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih baik tentang peran, siklus, serta metode pengelolaan kalium dalam tanah sangat diperlukan untuk mendukung pertanian yang berkelanjutan.

8.1 Sifat dan Peranan Kalium dalam Tanah

Kalium dalam tanah umumnya ditemukan dalam tiga bentuk utama, yaitu kalium terlarut, kalium yang dapat ditukar, dan kalium terikat dalam mineral tanah. Bentuk terlarut merupakan sumber utama yang tersedia bagi tanaman, sedangkan bentuk dapat ditukar dapat berperan sebagai cadangan yang dilepaskan sesuai kebutuhan tanaman. Kalium dalam mineral tanah biasanya tidak mudah tersedia dan memerlukan proses pelapukan yang lama agar dapat dimanfaatkan oleh tanaman (Khushboo, dkk. 2020).

Dari segi sifat kimia, kalium merupakan unsur yang memiliki mobilitas tinggi dalam larutan tanah dan berperan dalam keseimbangan ion tanah (Sayed, dkk. 2019). Kalium bersifat kation monovalen (K^+), sehingga mudah diserap oleh koloid tanah yang bermuatan negatif. Interaksi ini dipengaruhi oleh kapasitas tukar kation (KTK) tanah dan keberadaan kation lain seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) yang dapat bersaing dalam proses penyerapan oleh tanaman.

Secara fisika, kalium tidak memiliki peran langsung dalam struktur tanah, tetapi mempengaruhi ketersediaan air dan proses pertumbuhan akar tanaman. Kalium membantu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi stres, seperti kekeringan dan serangan penyakit, dengan mengatur keseimbangan air dalam sel tanaman.

Kalium memiliki berbagai peranan penting dalam proses fisiologis tanaman, antara lain:

1. **Regulasi Osmotik:** Kalium membantu mengatur keseimbangan air dalam tanaman, yang berpengaruh terhadap turgiditas sel dan transpirasi.
2. **Aktivasi Enzim:** Banyak enzim yang berperan dalam metabolisme tanaman memerlukan kalium sebagai kofaktor.
3. **Fotosintesis dan Transportasi Gula:** Kalium berperan dalam sintesis ATP dan distribusi hasil fotosintesis dari daun ke bagian lain tanaman.
4. **Ketahanan terhadap Cekaman Lingkungan:** Kalium membantu tanaman lebih tahan terhadap kekeringan, serangan patogen, dan ketahanan terhadap suhu ekstrem.
5. **Peningkatan Kualitas Hasil Panen:** Kalium berkontribusi dalam pembentukan protein, pati, serta meningkatkan kualitas hasil panen seperti rasa, warna, dan daya simpan produk pertanian (Huang, dkk. 2022).

Dengan memahami sifat dan peranan kalium dalam tanah, strategi pengelolaan kalium dapat disusun secara lebih efektif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk serta mempertahankan produktivitas tanah dalam jangka panjang. Selain itu, penggunaan metode analisis tanah yang tepat sangat penting untuk menentukan rekomendasi pemupukan yang sesuai, sehingga dapat meningkatkan efisiensi serapan kalium oleh tanaman dan mengurangi kehilangan unsur hara akibat pencucian atau fiksasi dalam tanah.

8.2 Bentuk-bentuk Kalium dalam Tanah

Kalium dalam tanah terdapat dalam beberapa bentuk yang berbeda berdasarkan tingkat ketersediaannya bagi tanaman, yaitu:

1. Kalium dalam Larutan Tanah

Bentuk ini tersedia secara langsung bagi tanaman karena berada dalam bentuk ion K^+ yang terlarut dalam air tanah. Kalium dalam larutan tanah merupakan bentuk kalium yang paling mudah tersedia bagi tanaman karena berada dalam bentuk ion K^+ yang terlarut dalam air tanah. Konsentrasi kalium dalam larutan tanah umumnya rendah, berkisar antara 1 hingga 10 mg/L, tergantung pada jenis tanah, tingkat pemupukan, serta faktor lingkungan seperti curah hujan dan irigasi. Meskipun jumlahnya relatif kecil, bentuk ini sangat penting karena menjadi sumber utama yang langsung dapat diserap oleh akar tanaman melalui mekanisme difusi dan aliran massa. Namun, keseimbangan kalium dalam larutan tanah bersifat dinamis, di mana ion K^+ yang terserap oleh tanaman akan segera digantikan oleh kalium dari bentuk lain, seperti kalium yang dapat ditukar atau yang dilepaskan dari mineral tanah. Oleh karena itu, manajemen pemupukan yang tepat sangat diperlukan untuk menjaga ketersediaan kalium dalam larutan tanah agar tetap optimal bagi pertumbuhan tanaman (Rahma, dkk. 2019).

Kalium dalam larutan tanah merupakan bentuk kalium yang paling mudah tersedia bagi tanaman karena berada dalam bentuk ion K^+ yang terlarut dalam air tanah. Konsentrasi kalium dalam larutan tanah umumnya rendah, berkisar antara 1 hingga 10 mg/L, tergantung pada jenis tanah, tingkat pemupukan, serta faktor lingkungan seperti curah hujan dan irigasi. Meskipun jumlahnya relatif kecil, bentuk ini sangat penting karena menjadi sumber utama yang langsung dapat diserap oleh akar tanaman melalui mekanisme difusi dan aliran massa. Namun, keseimbangan kalium dalam larutan tanah bersifat dinamis, di mana ion K^+ yang terserap oleh tanaman akan segera digantikan oleh kalium dari bentuk lain, seperti kalium yang dapat ditukar atau yang dilepaskan dari mineral tanah. Oleh karena itu, manajemen pemupukan yang tepat sangat diperlukan untuk menjaga ketersediaan kalium dalam larutan tanah agar tetap optimal bagi pertumbuhan tanaman.

2. Kalium yang Dapat Ditukar

Berada dalam kompleks koloid tanah dan dapat dengan mudah dilepaskan ke dalam larutan tanah. Kalium yang dapat ditukar merupakan fraksi kalium dalam tanah yang terikat pada permukaan partikel tanah, terutama pada mineral liat dan bahan organik. Fraksi ini sangat penting karena merupakan sumber kalium yang paling mudah tersedia bagi tanaman. Kalium yang dapat ditukar berada dalam kesetimbangan dinamis dengan kalium dalam larutan tanah, sehingga dapat dengan cepat diserap oleh akar tanaman. Kemampuan tanah untuk menyediakan kalium yang dapat ditukar dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis mineral liat, kapasitas tukar kation (KTK) tanah, pH tanah, dan kandungan bahan organik (Kaur, 2019). Pengukuran kalium yang dapat ditukar sangat penting dalam menentukan kebutuhan pemupukan kalium untuk menjaga ketersediaan hara yang optimal bagi pertumbuhan tanaman.

Selain itu, penting untuk dipahami bahwa kalium yang dapat ditukar dapat hilang dari tanah melalui beberapa proses, seperti pengambilan oleh tanaman yang mana tanaman menyerap kalium dari larutan tanah, yang kemudian digantikan oleh kalium yang dapat ditukar. Pencucian (*leaching*) dimana kalium dapat tercuci dari tanah, terutama pada tanah berpasir dengan curah hujan tinggi (Mu'min, dkk. 2016). Fiksasi dimana beberapa mineral liat dapat "memfiksasi" kalium, menjadikannya kurang tersedia bagi tanaman. Oleh karena itu, pengelolaan kalium yang tepat sangat penting untuk menjaga kesuburan tanah dan produksi tanaman yang optimal. Hal ini meliputi pemantauan kadar kalium tanah, pemupukan yang seimbang, dan praktik-praktik konservasi tanah untuk mencegah kehilangan kalium.

3. Kalium Terikat dalam Mineral Primer

Kalium terikat dalam mineral primer merupakan bentuk kalium yang paling melimpah di dalam tanah, namun ketersediaannya bagi tanaman sangat lambat. Mineral primer seperti feldspar dan mika mengandung kalium dalam struktur kristal mereka. Pelepasan kalium dari mineral-mineral ini terjadi melalui proses pelapukan kimiawi dan fisik yang sangat lambat. Akibatnya, kalium dalam bentuk ini tidak langsung tersedia untuk diserap oleh akar tanaman. Meskipun demikian, kalium terikat dalam mineral primer merupakan cadangan jangka panjang yang penting bagi kesuburan tanah. Seiring waktu, mineral-mineral ini akan terus melepaskan kalium ke dalam larutan tanah, menggantikan kalium yang hilang melalui pengambilan oleh tanaman dan proses lainnya (Yosef, dkk. 2015). Pemahaman tentang dinamika pelepasan kalium dari mineral primer sangat penting untuk pengelolaan kesuburan tanah jangka panjang, terutama di daerah dengan tanah yang sangat lapuk.

Feldspar (seperti ortoklas dan mikroklin) dan mika (seperti muskovit dan biotit) adalah mineral primer utama yang mengandung kalium. Setiap mineral memiliki tingkat pelapukan yang berbeda, yang memengaruhi

kecepatan pelepasan kalium (Smo, dkk. 2014). Pelapukan kimiawi, seperti hidrolisis dan pelarutan, memecah struktur kristal mineral dan melepaskan ion kalium. Pelapukan fisik, seperti perubahan suhu dan pembekuan-pencairan, juga membantu memecah mineral menjadi partikel yang lebih kecil, meningkatkan luas permukaan untuk pelapukan kimiawi. Faktor yang mempengaruhi pelapukan yaitu Iklim (suhu dan curah hujan), pH tanah, Kehadiran bahan organik, aktivitas mikroorganisme tanah.

4. Kalium Fiksasi

Kalium fiksasi adalah proses di mana ion kalium (K^+) terperangkap di antara lapisan-lapisan mineral liat, sehingga menjadi kurang tersedia bagi tanaman. Proses ini terutama terjadi pada mineral liat jenis 2:1, seperti vermikulit dan illit, yang memiliki kemampuan untuk 'mengunci' ion kalium di dalam strukturnya. Kalium yang terfiksasi tidak mudah larut dalam air dan tidak dapat ditukar dengan kation lain, sehingga tanaman kesulitan untuk menyerapnya. Faktor-faktor seperti jenis mineral liat, kelembaban tanah, dan siklus pengeringan-pembasahan dapat mempengaruhi tingkat fiksasi kalium. Pemahaman tentang kalium fiksasi sangat penting dalam pengelolaan kesuburan tanah, terutama di daerah dengan tanah yang kaya akan mineral liat jenis 2:1, untuk memastikan ketersediaan kalium yang cukup bagi pertumbuhan tanaman.

Dampak kalium fiksasi dapat menyebabkan penurunan ketersediaan kalium bagi tanaman. Kalium yang terfiksasi tidak mudah diserap oleh akar tanaman, sehingga dapat menyebabkan kekurangan kalium meskipun kadar kalium total dalam tanah tinggi. Kekurangan kalium dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman, mengurangi hasil panen, dan menurunkan kualitas hasil pertanian. Kalium fiksasi dapat menyebabkan ketidakseimbangan hara dalam tanah, karena ketersediaan kalium yang rendah dapat mengganggu penyerapan hara lainnya.

Cara mengatasi kalium fiksasi yaitu antara lain dengan (a) pemilihan jenis pupuk yang tepat dengan menggunakan pupuk kalium yang mudah larut dan tersedia bagi tanaman dapat membantu mengurangi dampak kalium fiksasi (Islam, dkk. 2018); (b) penambahan bahan organik ke dalam tanah dapat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah dan mengurangi fiksasi kalium, bahan organik juga dapat membantu meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, yang dapat membantu melepaskan kalium yang terfiksasi (Omokaro, dkk. 2024); (c) menjaga pH tanah pada kisaran yang optimal dapat membantu meningkatkan ketersediaan kalium dan mengurangi fiksasi (Olaniyan, dkk. 2022); (d) rotasi tanaman dengan tanaman yang memiliki sistem perakaran yang berbeda dapat membantu meningkatkan ketersediaan kalium (Qin, dkk. 2022); (e) menjaga kelembaban tanah yang optimal dapat membantu mengurangi fiksasi kalium, karena siklus pengeringan-pembasahan yang ekstrem dapat meningkatkan fiksasi.

8.3 Sumber dan Ketersediaan Kalium untuk Tanaman

(K) merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang berperan penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Sumber utama kalium di alam berasal dari mineral-mineral primer seperti feldspar dan mika, yang mengalami pelapukan secara alami sehingga melepaskan ion K^+ ke dalam larutan tanah. Selain itu, kalium juga tersedia dalam bentuk pupuk sintetis, seperti kalium klorida (KCl), kalium sulfat (K_2SO_4), dan kalium nitrat (KNO_3), yang umum digunakan dalam praktik pertanian untuk meningkatkan ketersediaan unsur ini bagi tanaman. Namun, ketersediaan kalium di dalam tanah sangat bergantung pada faktor-faktor seperti jenis tanah, kadar bahan organik, serta interaksi dengan kation lain seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}), yang dapat mempengaruhi keseimbangan dan ketersediaannya bagi tanaman. Oleh karena itu, manajemen pemupukan yang tepat diperlukan untuk

memastikan pasokan kalium yang optimal guna mendukung pertumbuhan tanaman secara efisien dan berkelanjutan.

Selain berasal dari mineral primer dan pupuk sintetis, ketersediaan kalium dalam tanah juga dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme dan dekomposisi bahan organik. Mikroorganisme tanah berperan dalam proses mineralisasi yang dapat melepaskan kalium dari bahan organik, sehingga meningkatkan ketersediaannya bagi tanaman. Selain itu, sifat tanah seperti tekstur dan kapasitas tukar kation (KTK) juga berpengaruh terhadap retensi dan pelepasan kalium. Tanah bertekstur liat dengan KTK tinggi cenderung mampu menyimpan lebih banyak kalium dibandingkan tanah berpasir yang memiliki KTK rendah, sehingga risiko kehilangan kalium akibat pencucian lebih besar pada tanah berpasir. Oleh karena itu, strategi pengelolaan kalium dalam sistem pertanian perlu mempertimbangkan sifat tanah, jenis pupuk, dan metode aplikasi yang tepat agar efisiensi serapan kalium oleh tanaman dapat dimaksimalkan. Praktik seperti pemberian pupuk secara bertahap, penggunaan bahan pembenah tanah seperti zeolit untuk meningkatkan retensi kalium, serta pemanfaatan sumber kalium alami dari limbah pertanian dapat menjadi alternatif dalam meningkatkan ketersediaan kalium yang lebih berkelanjutan bagi tanaman.

Kalium dalam tanah sebagian besar berasal dari mineral primer dan sekunder yang mengandung unsur ini dalam struktur kristalnya. Mineral primer penyusun kalium meliputi feldspar (ortoklas dan mikroklin) serta mika (biotit dan muskovit), yang melepaskan ion K^+ secara bertahap melalui proses pelapukan kimia dan fisika. Sementara itu, mineral sekunder seperti illit dan vermikulit juga berperan dalam menyimpan serta menyediakan kalium dalam bentuk yang lebih tersedia bagi tanaman. Kalium dalam mineral primer umumnya berada dalam bentuk tidak tersedia, karena terikat kuat dalam kisi kristal mineral dan hanya dilepaskan dalam jangka waktu yang lama. Sebaliknya, kalium dalam mineral

sekunder lebih mudah tersedia karena berada dalam bentuk yang dapat dipertukarkan pada kompleks koloid tanah. Proses pelepasan kalium dari mineral-mineral ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti pH tanah, aktivitas mikroba, serta interaksi dengan ion-ion lain di dalam tanah. Oleh karena itu, pemahaman tentang mineral penyusun kalium dalam tanah sangat penting dalam menentukan strategi pengelolaan hara yang efektif untuk meningkatkan ketersediaan kalium bagi tanaman.

Pupuk anorganik merupakan salah satu sumber utama kalium yang digunakan dalam praktik pertanian untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman secara cepat dan efisien. Beberapa jenis pupuk anorganik yang umum digunakan antara lain kalium klorida (KCl), kalium sulfat (K_2SO_4), dan kalium nitrat (KNO_3) (Sardans & Peñuelas, 2021). Kalium klorida merupakan pupuk kalium yang paling banyak digunakan karena memiliki kandungan K yang tinggi serta mudah larut dalam air, sehingga cepat tersedia bagi tanaman. Sementara itu, kalium sulfat sering dipilih untuk tanaman yang sensitif terhadap klorida, karena juga mengandung sulfur (S) yang bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman. Kalium nitrat, selain sebagai sumber kalium, juga menyediakan nitrogen dalam bentuk nitrat (NO_3^-) yang mudah diserap oleh tanaman. Meskipun pupuk anorganik dapat meningkatkan ketersediaan kalium dalam tanah secara langsung, penggunaannya yang berlebihan dapat menyebabkan ketidakseimbangan hara dan degradasi tanah. Oleh karena itu, pemupukan yang tepat dan berimbang sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi serapan kalium oleh tanaman serta menjaga kesuburan tanah dalam jangka Panjang.

Selain dari pupuk anorganik, kalium juga dapat diperoleh dari bahan organik yang berasal dari sisa tanaman, pupuk hijau, pupuk kandang, dan kompos. Sumber kalium organik ini biasanya mengandung unsur hara dalam bentuk yang lebih lambat tersedia dibandingkan pupuk anorganik, karena harus

mengalami proses dekomposisi terlebih dahulu oleh mikroorganisme tanah. Jerami padi, tandan kosong kelapa sawit, abu sekam, dan kompos dari limbah pertanian merupakan contoh bahan organik yang dapat menyumbangkan kalium ke dalam tanah (Harahap, dkk. 2020). Pupuk kandang, terutama dari kotoran ayam dan sapi, juga mengandung kalium yang bervariasi tergantung pada jenis pakan yang dikonsumsi ternak. Selain meningkatkan kandungan kalium, bahan organik juga berperan dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, seperti meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan aktivitas mikroba tanah. Dengan demikian, pemanfaatan sumber kalium dari bahan organik tidak hanya menyediakan hara bagi tanaman, tetapi juga mendukung keberlanjutan sistem pertanian dengan menjaga keseimbangan ekosistem tanah.

8.4 Pupuk Kalium dan Strategi Pemupukan

Pupuk kalium merupakan salah satu sumber utama kalium bagi tanaman yang digunakan untuk meningkatkan produktivitas serta kualitas hasil pertanian. Beberapa jenis pupuk kalium yang umum digunakan meliputi kalium klorida (KCl), kalium sulfat (K_2SO_4), dan kalium nitrat (KNO_3), masing-masing memiliki karakteristik dan kegunaan yang berbeda sesuai dengan kebutuhan tanaman serta kondisi tanah. Dalam strategi pemupukan, ketersediaan kalium bagi tanaman harus dioptimalkan dengan mempertimbangkan dosis, waktu aplikasi, metode pemberian, serta interaksi dengan unsur hara lain di dalam tanah. Aplikasi pupuk kalium dapat dilakukan melalui pemupukan langsung ke tanah, pemupukan daun, maupun melalui sistem fertigasi pada pertanian modern. Selain itu, kombinasi antara pupuk anorganik dan bahan organik, seperti kompos atau pupuk kandang, dapat meningkatkan efisiensi serapan kalium serta memperbaiki kualitas tanah secara berkelanjutan.

Penggunaan teknologi lepas lambat (*slow-release fertilizer*) juga menjadi salah satu strategi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi pemupukan dengan mengurangi kehilangan kalium akibat pencucian (Suci& Astar, 2022). Dengan penerapan strategi pemupukan yang tepat, pasokan kalium dapat dipertahankan dalam jumlah optimal, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang sehat dan hasil panen yang lebih maksimal.

Selain itu, efektivitas strategi pemupukan kalium juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis tanah, sistem budidaya, dan kebutuhan spesifik tanaman pada setiap fase pertumbuhannya. Tanaman yang berada pada fase generatif, seperti pembentukan bunga dan buah, umumnya memiliki kebutuhan kalium yang lebih tinggi dibandingkan fase vegetatif. Oleh karena itu, pemberian pupuk kalium sebaiknya disesuaikan dengan pola serapan hara tanaman untuk menghindari kekurangan atau kelebihan yang dapat berdampak negatif terhadap pertumbuhan.

Interaksi kalium dengan unsur hara lain juga perlu diperhatikan dalam strategi pemupukan. Misalnya, keberadaan kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) dalam jumlah berlebih dapat menghambat penyerapan kalium akibat kompetisi antar kation di dalam tanah. Sebaliknya, keseimbangan kalium yang baik dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan nitrogen dan fosfor, yang berperan dalam sintesis protein dan energi metabolik tanaman.

Untuk meningkatkan efisiensi pemupukan, metode aplikasi yang tepat juga perlu diterapkan. Pemupukan secara bertahap dengan dosis terkontrol dapat mengurangi kehilangan kalium akibat pencucian, terutama pada tanah berpasir dengan daya retensi yang rendah. Penggunaan bahan pembenah tanah seperti zeolit dan biochar juga dapat membantu mempertahankan kalium dalam zona perakaran sehingga lebih tersedia bagi tanaman dalam jangka waktu yang lebih lama.

Selain itu, penerapan teknologi pertanian presisi, seperti penggunaan sensor tanah dan sistem pemantauan hara berbasis digital, memungkinkan petani untuk mengoptimalkan pemupukan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Dengan pendekatan ini, dosis pupuk dapat disesuaikan secara spesifik berdasarkan kebutuhan tanaman dan karakteristik tanah, sehingga meningkatkan efisiensi serapan hara serta mengurangi dampak lingkungan akibat akumulasi residu pupuk.

Dengan mengombinasikan berbagai strategi pemupukan yang efektif dan berkelanjutan, ketersediaan kalium dalam tanah dapat dikelola dengan lebih baik, mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal, serta meningkatkan hasil panen yang berkualitas tinggi tanpa merusak keseimbangan ekosistem pertanian.

8.5 Peran Kalium dalam Produktivitas dan Ketahanan Tanaman

Kalium (K) memiliki peran krusial dalam meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman terhadap berbagai kondisi lingkungan. Sebagai salah satu unsur hara makro esensial, kalium berperan dalam mengatur keseimbangan air dalam sel tanaman, meningkatkan efisiensi fotosintesis, serta mendukung sintesis dan translokasi karbohidrat. Peningkatan ketersediaan kalium dalam tanah dapat mempercepat pembentukan jaringan tanaman yang lebih kokoh, meningkatkan pembungaan dan pembuahan, serta menghasilkan kualitas panen yang lebih baik, seperti buah yang lebih besar, rasa yang lebih manis, dan ketahanan penyimpanan yang lebih lama.

Selain itu, kalium juga berperan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Dalam kondisi kekeringan, kalium membantu mengatur tekanan osmotik sel sehingga mengurangi kehilangan air melalui transpirasi dan meningkatkan efisiensi penggunaan air oleh tanaman. Pada kondisi cekaman suhu tinggi atau rendah, kalium membantu menjaga stabilitas

membran sel dan mengurangi dampak negatif dari stres lingkungan. Dari segi ketahanan terhadap hama dan penyakit, kalium berkontribusi dalam memperkuat dinding sel tanaman, sehingga meningkatkan resistensi terhadap serangan patogen serta mengurangi risiko infeksi.

Kekurangan kalium dapat menyebabkan berbagai gangguan pertumbuhan, seperti klorosis (menguningnya daun), nekrosis (kematian jaringan), serta penurunan kualitas dan hasil panen. Oleh karena itu, manajemen pemupukan kalium yang tepat sangat penting untuk memastikan ketersediaan unsur ini dalam jumlah yang cukup sesuai dengan kebutuhan tanaman. Dengan pemenuhan kalium yang optimal, tanaman tidak hanya mampu tumbuh dengan baik dan menghasilkan panen yang tinggi, tetapi juga lebih tahan terhadap berbagai tekanan lingkungan, sehingga mendukung keberlanjutan produksi pertanian yang efisien dan ramah lingkungan.

Selain berperan dalam meningkatkan ketahanan individu tanaman, kalium juga berkontribusi terhadap stabilitas ekosistem pertanian secara keseluruhan. Tanaman dengan suplai kalium yang cukup cenderung lebih efisien dalam menyerap dan memanfaatkan unsur hara lainnya, seperti nitrogen (N) dan fosfor (P), sehingga mengurangi potensi kehilangan hara ke lingkungan. Efisiensi ini tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman tetapi juga membantu mengurangi dampak negatif akibat pencemaran nutrisi di perairan dan tanah.

Selain itu, kalium berperan dalam meningkatkan aktivitas enzim yang berhubungan dengan metabolisme energi, mempercepat proses pembelahan sel, dan mendukung pergerakan hasil fotosintesis dari daun ke bagian tanaman yang membutuhkan, seperti umbi, biji, atau buah. Dalam tanaman sereal seperti padi dan jagung, kalium berkontribusi dalam pengisian biji dan meningkatkan kualitas bulir, sementara pada tanaman hortikultura seperti tomat dan cabai, kalium berperan dalam meningkatkan kandungan vitamin, warna, serta ketahanan pascapanen.

Strategi peningkatan ketersediaan kalium dalam tanah dapat dilakukan melalui kombinasi penggunaan pupuk anorganik dan bahan organik, penerapan pupuk lepas lambat (*slow-release fertilizer*), serta pemanfaatan teknologi pertanian presisi. Rotasi tanaman dengan spesies yang mampu meningkatkan efisiensi serapan kalium juga dapat menjadi salah satu alternatif dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Dengan memahami secara mendalam peran kalium dalam produktivitas dan ketahanan tanaman, petani dan praktisi pertanian dapat mengoptimalkan strategi pemupukan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Pengelolaan kalium yang tepat tidak hanya meningkatkan hasil pertanian dalam jangka pendek, tetapi juga menjaga keseimbangan hara tanah untuk keberlanjutan produksi pertanian di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Harahap FS, Walida H, Rahmaniah, Rauf A, Hasibuan R, Nasution AP. 2020. Pengaruh Aplikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Arang Sekam Padi terhadap Beberapa Sifat Kimia Tanah pada Tomat. *Agrotechnology Research Journal*, 4(1), 1-5.
- Huang W, Lin M, Liao J, Li A, Tsewang W, Chen X, Liu S, Zheng P, & Sun B. 2022. Effects of Potassium Deficiency on the Growth of Tea (*Camelia sinensis*) and Strategies for Optimizing Potassium Levels in Soil: A Critical Review. *Horticulturae*, 8, 660.
- Islam S, Timsina J, Gathala MK, Salim M, & Majumdar K. 2018. Potassium Supplying Capacity of Diverse Soils and K-Use Efficiency of Maize in South Asia. *Agronomy*, 8, 121.
- Kaur H. 2019. Forms of Potassium in Soil and their Relationship with Soil Properties- A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8 (10).
- Khushboo, Bhat MA, Wani MA, & Bangroo SA. 2020. Distribution of Various Geochemical Forms of Potassium under Horticulture Land Use System of District Ganderbal. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 39 (43), 1-10.
- Mu'min MI, Joy B, & Yunianrti A. 2016. Dinamika Kalium Tanah dan Hasil Padi Sawah (*Oryza sativa* L.) akibat Pemberian NPK Majemuk dan Penggenangan pada Fluvaquentic Epiaquepts. *Soilrens*, 14(1).

- Olaniyan FT, Alori ET, Adekiya AO, Ayorinde BB, Daramola FY, Osemwegie OO, & Babalola OO. 2022. The Use Of Soil Microbial Potassium Solubilizers In Potassium Nutrient Availability In Soil And Its Dynamics. *Annals of Microbiology*, 72, 45.
- Omokaro GO, Osarhiemen IO, Idama V, Airueghian EO, West ST, Igbigbi FE, Nnake DC, Obolokor E, Ahmed A & Omoshie VO. 2024. The Role of Organic Amendments and Their Impact on Soil Restoration: A Review. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23 (11), 41-52.
- Qin J, Bian C, Duan S, Wang W, Li G & Liping Jin. 2022. Effects Of Different Rotation Cropping Systems On Potato Yield, Rhizosphere Microbial Community And Soil Biochemical Properties. *Frontiers*.
- Rahma S, Rasyid B, & Jayadi M. 2019. Peningkatan Unsur Hara Kalium dalam Tanah melalui Aplikasi Poc Batang Pisang dan Sabut Kelapa. *Jurnal Ecosolum*, 8(2).
- Sardans J, Peñuelas J. 2021. Potassium Control of Plant Functions: Ecological and Agricultural Implications. *Plants*, 10, 419.
- Sayed EL, Hellal FA, El Rab NG, & Zewainy RM. 2019. Ameliorative Effects of Potassium on the Salinity Stress in Plants: A Review. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 4(2), 1-15.
- SMO M, Brandt K, Gray ND, White ML, & Manning DAC. 2014. Comparison Of Silicate Minerals As Sources Of K For Plant Nutrition In Sandy Soil. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 653-662.
- Suci IA & Astar I. 2022. [Enkapsulasi Urea Menggunakan Biokomposit Zeolit Alam-Alginat-Pati Sagu sebagai Model Pupuk Lepas Lambat \(Slow Release Fertilizer\)](#). *Al-Kimia*, 10 (1).

Yosef B, Magen H, Johnston AE, & Kirkby EA. 2015. Potassium Fertilization: Paradox or K Management Dilemma?. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(2), 115–119.

BAB 9

UNSUR MAGNESIUM DALAM TANAH

Oleh Mauritz Pandapotan Marpaung

9.1 Pendahuluan

Magnesium (Mg) merupakan salah satu unsur hara esensial bagi tanaman yang berperan penting dalam proses fisiologis dan biokimia, terutama dalam pembentukan klorofil yang mendukung fotosintesis. Unsur ini juga berperan dalam aktivitas enzim, sintesis protein, serta transportasi dan metabolisme energi dalam jaringan tanaman. Kekurangan magnesium dalam tanah dapat menyebabkan berbagai permasalahan pertumbuhan tanaman yang berdampak pada produktivitas hasil pertanian.

Bab ini disusun untuk memberikan pemahaman yang mendalam mengenai peran, dinamika, serta pengelolaan unsur magnesium dalam tanah. Saat ini kajian tentang magnesium seing kali kurang mendapatkan perhatian dibandingkan dengan unsur hara makro lainnya seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) padahal, keseimbangan magnesium dalam tanah sangat penting untuk mendukung pertumbuhan tanaman yang optimal serta menjaga kualitas dan kesuburan tanah dalam jangka panjang. Selain itu, perubahan iklim, penggunaan pupuk yang tidak seimbang dan degradasi tanah akibat praktik pertanian yang tidak berkelanjutan dapat mempengaruhi ketersediaan magnesium dalam tanah. Oleh karena itu, bab ini akan membahas sifat fisik dan sifat kimia dari unsur magnesium, sumber magnesium dalam tanah, faktor-faktor yang mempengaruhi ketersediaanya, gejala defisiensi dan toksisitas

pada tanaman, serta strategi pengelolaan dan pemupukan yang tepat guna mengoptimalkan ketersediaan magnesium di berbagai jenis tanah pertanian.

Diharapkan buku ini dapat menjadi referensi bagi akademisi, mahasiswa, peneliti, penyuluh pertanian, serta praktisi pertanian dalam memahami pentingnya unsur magnesium dalam sistem tanah-tanaman. Dengan informasi yang komprehensif, pembaca dapat menerapkan strategi manajemen unsur hara yang lebih baik dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan peningkatan produktivitas lahan pertanian.

9.2 Sifat Fisika dan Sifat Kimia Magnesium

9.2.1 Sifat Fisika Magnesium

Magnesium ditemukan oleh Humphrey Davy pada tahun 1808 melalui proses elektrolisis. Magnesium memiliki beberapa sifat fisik diantaranya adalah (Gupta & Sharon, 2011; Uttley, 2000):

1. Merupakan logam putih keperakan
2. Memiliki bobot yang paling ringan (sekitar 66% dari berat aluminium dan hanya 25% dari berat baja).
3. Pada suhu ruang (kamar), magnesium berbentuk padatan.
4. Berat jenis pada suhu 20°C adalah 1,738 g/cm³.
5. Titik lelehnya berada pada 1200°F (651°C)
6. Titik leburnya sebesar 1090°C.
7. Konduktivitas termal pada suhu 27°C sebesar 156 W/mK
8. Kapasitas panas spesifik pada suhu 20°C sebesar 1,025 kJ/kg K

Proses menghasilkan magnesium dalam elektrolisis terdiri dari beberapa tahap, diantaranya (Ahmad & Baradja, 2019):

1. Magnesium hidroksida diubah menjadi magnesium klorida melalui reaksi dengan asam klorida.



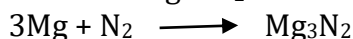
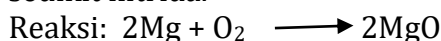
2. Untuk menghasilkan logam magnesium, dilakukan elektrolisis leburan $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ secara tidak langsung karena melalui pemanasan akan terbentuk MgO .



9.2.2 Sifat Kimia Magnesium

Selain sifat fisika, magnesium juga memiliki sifat kimia yang berkaitan dengan reaktivitas atom tersebut. Adapun sifat-sifat kimia dari magnesium yaitu (Ahmad & Baradja, 2019):

1. Magnesium dapat terbakar di udara dengan nyala terang menghasilkan magnesium oksida (MgO) dan sedikit nitrida.



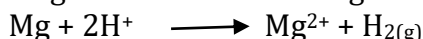
2. Dengan air dingin, magnesium tidak dapat bereaksi namun dapat bereaksi dengan air panas



3. Magnesium terbakar dalam karbon dioksida



4. Magnesium bereaksi dengan asam encer



5. Magnesium tidak bereaksi dengan larutan basa

9.3 Sumber Magnesium dalam Tanah

Magnesium (Mg) adalah salah satu unsur hara makro sekunder yang esensial bagi pertumbuhan tanaman. Unsur ini berperan penting dalam proses fotosintesis, sintesis protein, aktivasi enzim serta transportasi nutrisi dalam tanaman. Sumber magnesium dalam tanah dapat berasal dari beberapa komposisi utama, diantaranya:

1. Mineral primer dalam tanah (Sparks et al., 2023; Weil & Brady, 2017)

Mineral primer merupakan sumber utama magnesium di dalam tanah. Magnesium dilepaskan ke dalam larutan tanah melalui proses pelapukan mineral. Adapun

beberapa mineral primer yang mengandung magnesium yaitu:

- a. Olivin ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) : salah satu mineral silikat kaya akan magnesium.
 - b. Piroksen dan amfibol: kelompok mineral silikat mengandung magnesium dalam jumlah yang signifikan
 - c. Biotit ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$): mineral mika yang mengandung magnesium
 - d. Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): mineral karbonat yang berfungsi untuk sumber magnesium dan kalsium dalam tanah.
2. Mineral Sekunder dalam Tanah (Lindsay, 1980; Schlesinger & Bernhardt, 2013):
Mineral sekunder merupakan hasil dari pelapukan mineral primer dan dapat menjadi cadangan magnesium dalam tanah. Mineral sekunder tersebut seperti:
- a. Vermikulit: mineral ini mampu menyerap dan melepaskan magnesium dalam tanah.
 - b. Klorit: merupakan mineral lempung yang mengandung magnesium dalam strukturnya.
 - c. Montmorilonit: mineral dalam kelompok smektit yang dapat bertindak sebagai reservoir magnesium.
3. Bahan organik tanah
Magnesium dalam bahan organik tanah berasal dari sisa-sisa tanaman dan organisme yang mengalami dekomposisi (penguraian/pembusukan). Proses mineralisasi bahan organik akan melepaskan magnesium ke dalam larutan tanah yang dapat diserap oleh tanaman.
4. Pupuk dan amandemen tanah (Fageria et al., 2010; Mengel & Kirkby, 2001)
Magnesium juga dapat ditambahkan ke dalam tanah melalui aplikasi pupuk atau amandemen tanah, seperti:
- a. Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): digunakan untuk meningkatkan pH tanah dan menyediakan magnesium.

- b. Kierserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$): bentuk sulfat magnesium yang dapat larut dalam air dan mudah diserap oleh tanaman.
 - c. Langbeinit ($\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$): pupuk yang mengandung kalium dan magnesium.
5. Air irigasi
- Dalam beberapa kondisi, air irigasi juga dapat menjadi sumber magnesium bagi tanah. Air tanah yang mengandung ion magnesium (Mg^{2+}) dapat meningkatkan ketersediaan magnesium bagi tanaman.

9.4 Faktor-Faktor Mempengaruhi Ketersediaan Magnesium dalam Tanah

Magnesium merupakan unsur hara makro sekunder yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman. Ketersediaannya dalam tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik, kimia dan biologis. Berikut adalah faktor-faktor utama yang mempengaruhi ketersediaan magnesium dalam tanah:

1. Sumber magnesium dalam tanah
Magnesium dalam tanah berasal dari beberapa sumber utama, seperti mineral primer, mineral sekunder, bahan organik, pupuk dan amandemen tanah.
2. pH tanah
pH tanah sangat mempengaruhi kelarutan dan ketersediaan magnesium. Pada pH rendah ($<5,5$), magnesium mudah tercuci dan mengalami kehilangan dari lapisan akar tanaman. Pada pH netral hingga sedikit basa ($6,0-7,5$), magnesium tetap dalam bentuk ion Mg^{2+} yang mudah diserap oleh akar tanaman. Pada pH tinggi ($>7,5$), magnesium dapat mengendap sebagai magnesium karbonat, sehingga tidak tersedia bagi tanaman (Fageria et al., 2010; Marschner, 2011; Rowell, 1994).
3. Tekstur tanah
Tekstur tanah berperan dalam menentukan kapasitas tanah untuk menyimpan dan menyediakan magnesium. Pada tanah berpasir, memiliki kapasitas tukar kation (KTK) rendah, sehingga magnesium mudah tercuci. Pada

tanah lempung dan liat, memiliki kapasitas tukar kation lebih tinggi sehingga mampu menyimpan magnesium lebih baik (Schlesinger & Bernhardt, 2013; Weil & Brady, 2017).

4. Interaksi dengan unsur hara lain

Beberapa unsur hara dapat bersaing dengan magnesium dalam penyerapan oleh tanaman yaitu: unsur kalium (K): pemupukan kalium yang berlebihan dapat menekankan penyerapan magnesium. Unsur kalsium (Ca), dengan kelebihan kalsium dalam tanah (misalnya dari kapur pertanian) dapat mengurangi ketersediaan magnesium. Dan ion amonium (NH_4^+), pemupukan nitrogen dalam bentuk amonium dapat menghambat penyerapan magnesium oleh akar tanaman (Fageria et al., 2010; Marschner, 2011; Mengel & Kirkby, 2001).

5. Aktivitas biologis dalam tanah

Mikroorganisme berperan dalam siklus magnesium melalui dekomposisi bahan organik dan peningkatan penyerapan oleh tanaman. Aktivitas mikroba yang tinggi dapat meningkatkan pelepasan dari bahan organik. Mikoriza yang merupakan cendawan (fungi) dapat membantu tanaman menyerap magnesium dengan lebih efisien (Stevenson, 1994; Sylvia et al., 2005).

9.5 Gejala Defisiensi Magnesium dan Toksisitas pada Tanaman

Defisiensi magnesium terjadi ketika tanaman tidak mendapatkan pasokan magnesium yang cukup dari tanah,, yang sering kali disebabkan oleh rendahnya ketersediaan Mg^{2+} akibat pencucian, antagonisme ionik (interaksi dengan kalsium dan kalium) atau ketidakseimbangan pH tanah.

1. Gejala Visual Defisiensi Magnesium:

- a. Klorosis interveinal: gejala awal terjadi pada daun tua, dimana jaringan antar tulang daun (interveinal) menguning sedangkan tulang daun tetap hijau. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya sintesis klorofil akibat kurangnya magnesium (Marschner, 2011).

- b. Nekrosis dan pengguguran daun: Jika defisiensi berlanjut, area klorosis berubah menjadi coklat (nekrosis) dan daun mulai gugur sebelum waktunya (Mengel & Kirkby, 2001).
 - c. Pertumbuhan terhambat dan daun melengkung: tanaman dengan kekurangan magnesium menunjukkan pertumbuhan yang terhambat dengan daun yang melengkung ke atas atau ke bawah (Fageria et al., 2010).
 - d. Bercak ungu atau merah pada daun: pada beberapa tanaman seperti tomat dan jagung, defisiensi magnesium dapat menyebabkan munculnya warna ungu atau merah pada daun akibat akumulasi antonsianin (Weil & Brady, 2017).
 - e. Penurunan produksi dan kualitas hasil panen: defisiensi magnesium dapat mengurangi ukuran, kualitas, dan jumlah hasil panen karena gangguan dalam metabolisme energi dan fotosintesis.
2. Penyebab defisiensi magnesium dalam tanah dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu pencucian akibat curah hujan tinggi atau irigasi berlebihan, tanah berpasir dengan kapasitas tukar kation (KTK) rendah, pemupukan kalium atau kalsium berlebih yang menghambat penyerapan Mg^{2+} , tanah dengan pH sangat rendah atau sangat tinggi yang mempengaruhi ketersediaan Mg^{2+} dan ketidakseimbangan unsur hara akibat pemupukan nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4^+) (Rhoades et al., 1992; Rowell, 1994).
 3. Toksisitas magnesium lebih jarang terjadi dibandingkan defisiensi, tetapi dapat terjadi terutama di tanah dengan konsentrasi Mg^{2+} yang sangat tinggi. Penyebab toksisitas magnesium dalam tanah diantaranya pemupukan magnesium berlebihan, tanah dengan pH tinggi, ketidakseimbangan kation dalam tanah dan kondisi tanah kering yang ekstrim (Rowell, 1994; Sparks et al., 2023; Tisdale et al., 1993).

Ketersediaan magnesium dalam tanah harus dijaga dalam keseimbangan yang tepat untuk menghindari defisiensi dan toksisitas. Defisiensi magnesium menyebabkan klorosis interveinal, nekrosis, dan pertumbuhan terhambat, sementara toksisitas magnesium dapat menghambat penyerapan unsur hara lain, terutama kalsium dan kalium. Pengelolaan pupuk yang tepat dan pemantauan pH serta keseimbangan unsur hara dalam tanah sangat penting untuk mencegah terjadinya defisiensi magnesium.

9.6 Strategi Pengelolaan dalam Mengoptimalkan Ketersediaan Magnesium di Berbagai Jenis Tanah Pertanian

Pengelolaan dan pemupukan yang tepat sangat penting untuk mengoptimalkan ketersediaan magnesium di berbagai jenis tanah pertanian. Berikut ini adalah strategi yang dapat diterapkan yaitu:

1. Analisis tanah dan penentuan kebutuhan magnesium
Langkah pertama dalam pengelolaan magnesium adalah melakukan analisis tanah untuk mengetahui kadar Mg yang tersedia. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam menentukan dosis dan jenis pupuk yang akan digunakan. Pemahaman tentang sifat kimia dan mineralogi tanah sangat penting dalam menentukan kebutuhan pemupukan yang tepat (Nursyamsi & Suprihati, 2005).
2. Penggunaan pupuk magnesium
Pemberian pupuk yang mengandung magnesium, seperti kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) atau dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), dapat meningkatkan kadar Mg dalam tanah. Kieserit merupakan sumber magnesium yang mudah larut dan cepat tersedia bagi tanaman, sementara dolomit juga berfungsi menaikkan pH tanah masam selain menyediakan Mg.
3. Pengapuran pada tanah masam
Pada tanah dengan pH rendah, ketersediaan Mg dapat berkurang. Pengapuran menggunakan dolomit tidak hanya menaikkan pH tanah tetapi juga menambah

kandungan Mg. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengapuran dengan dolomit efektif dalam meningkatkan pertumbuhan dan produksi biomassa tanaman sorgum di tanah masam (Prihantoro et al., 2023).

4. Penambahan bahan organik

Bahan organik seperti pupuk kandang atau kompos dapat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah, sehingga meningkatkan retensi dan ketersediaan Mg bagi tanaman. Selain itu, dekomposisi bahan organik melepaskan Mg yang dapat diserap oleh tanaman (Maro'ah et al., 2021).

5. Pengaturan keseimbangan hara

Keseimbangan antara nitrogen (N) dan magnesium penting untuk pertumbuhan optimal tanaman. Pemberian nitrogen yang berlebihan tanpa diimbangi dengan Mg dapat menyebabkan defisiensi Mg. Studi pada tanaman jagung menunjukkan bahwa pengaturan dosis N dan Mg yang tepat dapat meningkatkan pertumbuhan dan produksi (Damanhuri et al., 2022).

6. Pemantauan dan evaluasi

Pemantauan rutin terhadap kadar Mg dalam tanah dan tanaman penting untuk menilai efektivitas strategi pengelolaan yang diterapkan. Analisis tanah dan jaringan tanaman secara berkala dapat membantu dalam menyesuaikan dosis dan jenis pupuk yang digunakan, memastikan ketersediaan Mg yang optimal (Damayanti, 2023).

Dengan menerapkan strategi-strategi tersebut, ketersediaan magnesium dalam tanah pertanian dapat dioptimalkan, mendukung pertumbuhan dan produktivitas tanaman yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, H., & Baradja, L. (2019). *Ensiklopedia Eksperimen Kimia 2*. Penerbit Nuansa Cendekia.
- Damanhuri, Widodo, T. W., & Fauzi, A. F. (2022). Pengaturan Keseimbangan Nitrogen dan Magnesium untuk Meningkatkan Pertumbuhan dan Produksi Jagung (*Zea Mays L.*). *Jurnal Ilmiah Inovasi*, 22(1), 10–15.
- Damayanti, F. E. (2023, June 5). *Selengkapnya bisa dilihat di link berikut : https://hannainst.id/strategi-pengelolaan-tanah-dalam-perkebunan-menjaga-kesuburan-dan-produktivitas/?utm_source=chatgpt.com*.
https://Hannainst.Id/Strategi-Pengelolaan-Tanah-Dalam-Perkebunan-Menjaga-Kesuburan-Dan-Produktivitas/?Utm_source=chatgpt.Com.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Jones, C. A. (2010). *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops*. CRC Press.
- Gupta, M., & Sharon, N. M. L. (2011). *Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*. Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Lindsay, W. L. (1980). Chemical Equilibria in Soils. In *Clays and Clay Minerals* (4th ed., Vol. 28). Wiley-Interscience.
- Maro'ah, S., Sunarminto, bambang H., & Utami, S. N. H. (2021). Status Kesuburan Tanah sebagai Dasar Strategi Pengelolaan Lahan Sawah di Kabupaten Bantul, Indonesia. *AgriHealth: Journal of Agri-Food, Nutrition and Public Health*, 2(2), 78–87.
- Marschner, H. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of Plant Nutrition*. Springer.

- Nursyamsi, D., & Suprihati. (2005). Sifat-sifat Kimia dan Mineralogi Tanah serta Kaitannya dengan Kebutuhan Pupuk untuk Padi (*Oryza sativa*), Jagung (*Zea mays*), dan Kedelai (*Glycine max*). *Buletin Agronomi*, 33(3), 40–47.
- Prihantoro, I., Permana, A. T., Suwanto, Aditia, E. L., & Waruwu, Y. (2023). Efektivitas Pengapuran dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Sorgum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) sebagai Hijauan Pakan Ternak. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, 28(2), 297–304.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). *The Use of Saline Waters for Crop Production*.
- Rowell, D. L. (1994). *Soil Science: Methods & Applications*. Longman.
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry An Analysis of Global Change* (3rd ed.). Academic Press.
- Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2023). *Environmental Soil Chemistry* (3rd ed.). Elsevier Inc.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). *Principles and Applications of Soil Microbiology* (2nd ed.). Pearson.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D., & Havlin, J. L. (1993). *Soil Fertility and Fertilizers* (5th ed.). Macmillan Publishing.
- Uttley, C. (2000). *The Elements Magnesium*. Marshall Cavendish.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (5th ed.). Pearson.

BAB 10

UNSUR KALSIUM DALAM TANAH

Oleh Anselmus Boy Baunsele

10.1 Pengantar tentang Kalsium

Kalsium adalah mineral esensial makro yang memiliki peran penting dalam berbagai fungsi baik di makhluk hidup maupun di lingkungan abiotik. Dengan simbol kimia Ca dan nomor atom 20, kalsium termasuk dalam kelompok logam alkali tanah dan merupakan salah satu unsur paling melimpah di kerak bumi. Dalam tanah, kalsium umumnya tersedia dalam bentuk ion kalsium (Ca^{2+}), yang dapat ditemukan dalam larutan tanah, sebagai bagian dari mineral tanah (seperti kalsium karbonat atau kalsium sulfat), dan juga terikat pada partikel-partikel tanah, terutama dalam struktur tanah liat.

Bagi tubuh manusia, kalsium berkontribusi pada beberapa aspek kesehatan, antara lain:

- Kesehatan Tulang dan Gigi: Sekitar 99% kalsium dalam tubuh disimpan di tulang dan gigi, di mana ia berfungsi untuk membangun dan mempertahankan kekuatan struktural. Selain di tulang dan gigi, kalsium juga terdapat dalam tubuh lain misalnya darah, otot dan jaringan. Kalsium membantu memberikan kekuatan pada enamel gigi, lapisan terluar gigi yang melindungi gigi dari erosi, pembusukan, dan sensibilitas akibat suhu. Kalsium sangat penting selama masa pertumbuhan dan juga berperan dalam memperlambat hilangnya kepadatan tulang seiring bertambahnya usia, yang dapat mencegah osteoporosis. Asupan kalsium yang cukup pada masa kanak-kanak dapat meningkatkan kepadatan tulang, yang berarti memberikan proteksi terhadap osteoporosis di

masa dewasa. Hal ini telah dibuktikan oleh penelitian yang menunjukkan bahwa asupan kalsium yang memadai dapat mengurangi risiko osteoporosis di masa depan (Setyorini et al., 2016). Tulang manusia melakukan proses *remodel* yang terus-menerus, di mana sel-sel tulang yang sudah lama diganti dengan yang baru. Proses ini membutuhkan kalsium untuk menyerap dan menjaga konsentrasi kalsium darah pada tingkat optimal. *Osteoblasts*, sel yang bertanggung jawab dalam pembentukan dan pemeliharaan tulang, menggunakan kalsium untuk membangun dan memperbaiki struktur tulang.

- **Kontraksi Otot:** Kalsium diperlukan untuk proses kontraksi otot. Ketika saraf merangsang otot, kalsium dilepaskan untuk membantu protein dalam otot melakukan kontraksi. Ini juga berlaku untuk otot jantung, di mana kalsium membantu menjaga detak jantung yang teratur. Fakta bahwa otot polos terdapat di hampir setiap organ berongga dan terlibat dalam sejumlah besar kondisi penyakit telah menyebabkan peningkatan besar dalam penelitian otot polos, yang mencakup area dari pengujian respons terhadap antagonis dan agonis hingga pengukuran gaya molekuler yang dihasilkan oleh filamen aktin tunggal. Namun, mekanisme pasti yang mengatur respons kontraktile otot polos masih belum terpecahkan. Kalsium telah menjadi pemain utama dalam memediasi kontraksi otot polos melalui pengikatan dengan kalmodulin, meskipun ada bukti yang menunjukkan bahwa dalam keadaan khusus otot polos dapat berkontraksi tanpa perubahan Ca^{2+} intraseluler. Selain jalur regulasi utama kinase rantai ringan Ca^{2+} -kalmodulin-miogenin, ada mekanisme regulasi terkait filamen tipis lainnya di mana fosforilasi kalponin dan kaldesmon yang bergantung pada Ca^{2+} -kalmodulin mungkin terlibat. Sensitivitas Ca^{2+} dari kontraksi otot polos dapat bervariasi dalam situasi yang berbeda dan baru-baru ini diakui sebagai mekanisme regulasi yang

penting. Contohnya adalah fosforilasi kinase rantai ringan miosin yang bergantung pada protein kinase C (PKC) yang menghasilkan penghambatan sebagian kontraksi, dan aktivasi fosfatase rantai ringan miosin. Ada bukti baru yang menunjukkan bahwa Ca^{2+} tidak hanya mengatur kontraksi dengan mengatur interaksi protein kontraktil dalam otot polos, tetapi juga bahwa pemendekan otot polos itu sendiri mengurangi konsentrasi Ca^{2+} intraseluler, melalui umpan balik negatif.

Kalsium memicu kontraksi dengan bereaksi dengan protein pengatur yang, jika tidak ada kalsium, mencegah interaksi aktin dan miosin. Dua sistem pengatur yang berbeda ditemukan di otot yang berbeda. Dalam pengaturan terkait aktin, troponin dan tropomiosin mengatur aktin dengan memblokir situs pada aktin yang diperlukan untuk pembentukan kompleks dengan miosin; dalam pengaturan terkait miosin, situs pada miosin diblokir jika tidak ada kalsium. Fitur utama kontrol aktin adalah sebagai berikut: ada persyaratan untuk tropomiosin dan kompleks troponin yang memiliki tiga subunit berbeda dengan fungsi yang berbeda; aktin menunjukkan perilaku kooperatif; dan pergerakan tropomiosin terjadi yang dikendalikan oleh pengikatan kalsium pada troponin. Pengaturan miosin dikendalikan oleh subunit pengatur yang dapat dipisahkan dalam miosin kerang secara reversibel dengan menghilangkan kation divalen dengan EDTA. Kontrol miosin dapat berfungsi dengan aktin murni jika tidak ada tropomiosin. Pengikatan kalsium dan pengaturan miosin moluska bergantung pada keberadaan rantai ringan pengatur. Diusulkan bahwa rantai ringan berfungsi dengan memblokir situs miosin secara sterik saat tidak ada kalsium, dan bahwa keadaan "mati" miosin memerlukan kerja sama antara kedua kepala miosin. Baik kontrol miosin maupun kontrol aktin tersebar luas di berbagai organisme. Banyak invertebrata memiliki otot dengan kedua jenis pengaturan tersebut. Kontrol aktin tidak ada

pada otot moluska dan beberapa filum minor yang kekurangan troponin. Kontrol miosin tidak ditemukan pada otot vertebrata lurik dan otot cepat dekapoda krustasea, meskipun rantai ringan pengatur ada. Sementara kontrol miosin *in vivo* mungkin tidak dikecualikan dari otot lurik vertebrata, kontrol miosin mungkin tidak ada sebagai akibat dari mutasi rantai berat miosin.

- **Pembekuan Darah:** Kalsium memainkan peran penting dalam proses pembekuan darah, yang melibatkan beberapa langkah biokimia yang kompleks. Tahapannya berupa aktivasi faktor koagulasi, pembentukan kompleks enzim-faktor koagulasi, serta stabilisasi dan aktivasi faktor-faktor kunci dalam jalur ekstrinsik dan intrinsik. Tanpa kalsium, proses pembekuan darah tidak dapat berlangsung dengan efisien, yang dapat menyebabkan masalah pembekuan seperti perdarahan berlebih. Mekanisme pembekuan darah dengan bantuan kalsium adalah ketika koagulasi heterotetramerik yang setelah diaktifkan oleh pengikatan kalsium/pembelahan trombin, secara kovalen mengikat gumpalan fibrin yang telah terbentuk sebelumnya dan melindunginya dari fibrinolisis dini (Singh et al., 2019). Misalkan ketika terjadi luka maka Pembuluh darah menyempit untuk mengurangi aliran darah ke area cedera, trombosit akan berinteraksi dengan ion Ca^{2+} menempel pada tempat cedera, selanjutnya kompleks tersebut membentuk sumbat sementara. Pembekuan darah sebenarnya terjadi ketika sejumlah faktor koagulasi membentuk fibrin yang mengikat trombosit dan sel darah merah menjadi sumbat yang lebih stabil.
- **Transmisi Sinyal Saraf:** Mineral ini juga berfungsi dalam pengiriman sinyal antar sel saraf, yang penting untuk komunikasi dalam sistem saraf. Ketika ada signal yang masuk ke saraf maka ion Ca^{2+} akan masuk ke dalam sel saraf kemudian berinteraksi dengan protein kunci yang kemudian akan mengaktifkan kerja hormon dan

mengubah signal tersebut menjadi respon untuk dilaksanakan oleh tubuh (Rosenberg & Spitzer, 2011).

- **Regulasi Tekanan Darah:** Kalsium dapat membantu menjaga tekanan darah normal dengan mempengaruhi kontraksi otot polos di pembuluh darah. Ketika kalsium masuk ke dalam sel otot halus pembuluh darah, ia mengaktifkan serangkaian proses yang mengarah pada kontraksi otot tersebut. Ion kalsium mengikat troponin pada filamen aktin dalam sel otot halus, yang memicu interaksi antara aktin dan myosin, dua protein yang bertanggung jawab untuk kontraksi otot. Kontraksi otot halus ini menyebabkan penyempitan pembuluh darah (vasokonstriksi), yang meningkatkan resistensi perifer dan pada gilirannya dapat meningkatkan tekanan darah. Sebaliknya, pengurangan konsentrasi kalsium di dalam sel otot halus akan menyebabkan relaksasi otot tersebut, yang menyebabkan pembuluh darah melebar (vasodilatasi). Vasodilatasi ini mengurangi resistensi perifer dan dapat menurunkan tekanan darah (Kim et al., 2019).

10.2 Sumber Kalsium

Kalsium adalah mineral penting yang berperan dalam berbagai fungsi tubuh, terutama dalam pembentukan dan pemeliharaan tulang serta gigi. Kalsium juga terlibat dalam proses pembekuan darah, kontraksi otot, dan pengaturan fungsi saraf. Berikut adalah beberapa sumber kalsium yang dapat dimasukkan dalam diet sehari-hari. Kalsium dapat diperoleh dari berbagai sumber makanan, termasuk:

- **Produk susu:** Susu, *yogurt*, dan keju. Susu sapi dan susu kambing merupakan sumber kalsium terbaik. Satu gelas susu sapi mengandung sekitar 275-350 mg kalsium, yang memenuhi 27-35% dari kebutuhan harian. Dalam satu cangkir *yogurt*, terdapat sekitar 260 mg kalsium, yang memenuhi sekitar 25% kebutuhan harian. Keju, terutama parmesan, sangat kaya akan kalsium. Dalam 30 gram keju parmesan terdapat sekitar 330 mg kalsium.

- Sayuran hijau: Seperti brokoli, terdapat sekitar 60 mg kalsium per 128 gram. Dalam satu cangkir bayam yang dimasak terdapat sekitar 268 mg kalsium. Selain itu kangkung dan *bok choy* juga merupakan sumber kalsium yang baik. Daun kelor diketahui memiliki kandungan kalsium yang tinggi sehingga hal ini menjadi alasan kelor dapat dikembangkan sebagai bahan makanan tambahan yang sangat bermanfaat bagi masyarakat misalnya olahan kelor untuk makanan pendamping ASI (Baunsele et al., 2023).
- Ikan: Seperti salmon dan sarden yang memiliki tulang lunak. Ikan sarden kalengan mengandung sekitar 240 mg kalsium per 60 gram, terutama dari tulangnya. Selain itu, ikan teri juga kaya akan kalsium karena tulangnya yang dapat dimakan.
- Kacang-kacangan misalnya almond mengandung sekitar 75 mg kalsium per 30 gram sedangkan kacang kedelai yang sering dijadikan produk olahan seperti tahu dan tempe juga merupakan sumber kalsium yang baik.
- Mineral kalsium misalnya: 1) Kalsit (CaCO_3): Merupakan bentuk utama kalsium yang ditemukan di alam, sering kali dalam bentuk batu kapur, marmer, dan batuan sedimen lainnya. Kalsium karbonat ini banyak digunakan dalam industri, serta menjadi sumber utama kalsium dalam gigi dan tulang; 2) Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): Mineral ini mengandung kalsium dalam bentuk kalsium sulfat, yang sering digunakan dalam pembuatan plester dan bahan bangunan; 3) Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$): Merupakan senyawa fosfat kalsium yang ditemukan di batuan fosfat, dan juga merupakan komponen utama dalam tulang dan gigi hewan serta manusia.
- Batuan sedimen: Banyak batuan sedimen seperti batu kapur mengandung kalsium karbonat dalam jumlah besar. Batu kapur digunakan dalam konstruksi serta sebagai bahan baku untuk pembuatan semen.
- Tanah dan lempung: Tanah yang kaya akan kalsium seperti tanah yang terpengaruh oleh proses pelapukan

batuan kapur sering mengandung kalsium dalam bentuk ion kalsium (Ca^{2+}). Tanah dengan kandungan kalsium yang tinggi baik untuk pertumbuhan tanaman tertentu yang membutuhkan kalsium, seperti tanaman sayuran dan buah.

- Air laut: Lautan juga menjadi sumber kalsium, terutama dalam bentuk kalsium karbonat (CaCO_3), yang ditemukan dalam organisme laut seperti kerang, terumbu karang, dan plankton. Kalsium dalam air laut dapat juga diserap oleh organisme laut yang membentuk cangkang dan kerangka.

10.3 Kebutuhan Harian

Kebutuhan kalsium bervariasi berdasarkan usia dan kondisi kesehatan. Rata-rata orang dewasa membutuhkan sekitar 1.000 mg kalsium per hari, dan kebutuhan ini meningkat menjadi 1.200 mg setelah usia 50 tahun. Kekurangan kalsium dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti osteoporosis, rakitis pada anak-anak, dan kondisi lain yang berkaitan dengan kelemahan tulang.

Kebutuhan harian kalsium manusia bervariasi tergantung pada usia, jenis kelamin, dan kondisi fisiologis seperti kehamilan atau menyusui. Kalsium adalah mineral esensial yang berperan penting dalam pembentukan tulang dan gigi, kontraksi otot, transmisi saraf, dan pembekuan darah. Berikut penjelasan mengenai kebutuhan harian kalsium berdasarkan kelompok usia:

1. Bayi dan Anak-anak. Pada masa ini, kalsium sangat penting untuk mendukung pertumbuhan tulang dan gigi yang optimal.
 - 0–6 bulan: 200 mg/hari
 - 7–12 bulan: 260 mg/hari
 - 1–3 tahun: 700 mg/hari
 - 4–8 tahun: 1.000 mg/hari
2. Remaja. Remaja membutuhkan lebih banyak kalsium karena sedang berada dalam fase percepatan

pertumbuhan, terutama untuk pembentukan massa tulang.

- 9–18 tahun: 1.300 mg/hari
3. Dewasa. Pada usia dewasa, kalsium penting untuk menjaga kepadatan tulang dan fungsi tubuh lainnya
- 19–50 tahun: 1.000 mg/hari
 - Wanita hamil dan menyusui (usia <19 tahun): 1.300 mg/hari
 - Wanita hamil dan menyusui (usia ≥19 tahun): 1.000 mg/hari
4. Lansia. Pada lansia, terutama wanita *pascamenopause*, kebutuhan kalsium meningkat untuk mencegah osteoporosis akibat penurunan hormon estrogen
- Pria >70 tahun: 1.200 mg/hari
 - Wanita >50 tahun: 1.200 mg/hari

Kekurangan kalsium dapat menyebabkan gangguan pada tulang seperti osteoporosis, osteopenia, kram otot, dan gangguan fungsi saraf. Secara umum, kekurangan kalsium dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Kekurangan kalsium dapat menyebabkan kelelahan ekstrem, di mana individu merasa lesu dan tidak memiliki energi. Hal ini sering disertai dengan kesulitan berkonsentrasi dan insomnia.
- Kalsium berperan penting dalam kontraksi otot. Kekurangan kalsium dapat menyebabkan kram otot, nyeri, dan ketegangan, terutama di area lengan dan paha saat bergerak.
- Gejala kesemutan pada tangan, kaki, atau area sekitar mulut bisa terjadi akibat gangguan fungsi saraf yang disebabkan oleh rendahnya kadar kalsium dalam tubuh.
- Kalsium diperlukan untuk menjaga fungsi jantung yang normal. Kekurangan kalsium dapat meningkatkan risiko aritmia atau detak jantung yang tidak teratur, yang berpotensi berbahaya.
- Kekurangan kalsium dapat memengaruhi kesehatan mental, menyebabkan gejala seperti kecemasan, depresi, dan iritabilitas.

- Kalsium sangat penting untuk kesehatan gigi. Kekurangan kalsium dapat menyebabkan gigi menjadi rapuh, mudah patah, serta masalah pada gusi seperti radang gusi.
- Kuku yang mudah patah dan rambut yang rontok juga merupakan tanda kekurangan kalsium. Kalsium adalah komponen penting dalam pembentukan kuku dan rambut yang sehat.
- Kekurangan kalsium dalam jangka panjang dapat mengurangi kepadatan tulang, membuat tulang lebih rapuh dan rentan terhadap patah bahkan tanpa cedera berat.

Kelebihan kalsium (hiperkalsemia) dapat menyebabkan masalah seperti batu ginjal, konstipasi, dan gangguan penyerapan mineral lain seperti zat besi dan magnesium. Secara garis besar, kelebihan kalsium menyebabkan beberapa masalah diantaranya:

- Meskipun kalsium penting untuk kesehatan tulang, kelebihan kalsium justru dapat menyebabkan nyeri tulang dan otot. Hal ini terjadi karena kelebihan kalsium dalam darah dapat mengurangi jumlah kalsium yang tersimpan di dalam tulang, membuat tulang menjadi rapuh dan lebih mudah patah.
- Kelebihan kalsium dapat meningkatkan risiko pembentukan batu ginjal. Ketika kadar kalsium dalam darah terlalu tinggi, ginjal harus bekerja lebih keras untuk menyaringnya, yang dapat menyebabkan pengendapan mineral dan pembentukan batu.
- Gejala gastrointestinal seperti mual, muntah, sembelit, dan sakit perut sering kali muncul pada individu dengan hiperkalsemia. Kelebihan kalsium dapat mengganggu fungsi normal sistem pencernaan.
- Penderita hiperkalsemia mungkin mengalami peningkatan frekuensi buang air kecil dan merasa lebih haus. Ini disebabkan oleh tubuh yang berusaha mengeluarkan kelebihan kalsium melalui urine, yang juga dapat menyebabkan dehidrasi.

- Kelebihan kalsium dapat mempengaruhi fungsi jantung, menyebabkan detak jantung tidak teratur (aritmia) atau jantung berdebar. Dalam kasus yang parah, ini bisa berakibat fatal.
- Hiperkalsemia dapat memengaruhi fungsi otak, menyebabkan gejala seperti kebingungan, mudah lupa, dan kelelahan mental. Kondisi ini bisa berujung pada masalah serius jika tidak ditangani.

Kelebihan kalsium di dalam tubuh dapat disebabkan oleh kondisi hiperparatiroidisme atau kelenjar paratiroid yang terlalu aktif memproduksi hormon paratiroid secara berlebihan. Selain itu kelebihan suplemen atau asupan makanan yang tinggi vitamin D dapat meningkatkan penyerapan kalsium. Penyebab lain adalah adanya beberapa jenis kanker dan penyakit ginjal juga dapat menyebabkan peningkatan kadar kalsium dalam darah.

10.4 Keberadaan Kalsium di Tanah

10.4.1 Fungsi Utama Kalsium dalam Tanah

Kalsium (Ca) merupakan elemen penting dalam tanah yang memiliki beberapa fungsi utama untuk mendukung kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman. Beberapa fungsi kalsium dalam tanah dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Kalsium membantu dalam pembentukan agregat tanah dengan mengikat partikel tanah (seperti lempung) menjadi gumpalan yang lebih besar. Hal ini meningkatkan porositas tanah, memperbaiki drainase, dan aerasi. Selanjutnya tanah dengan kandungan kalsium yang memadai cenderung lebih stabil dan tidak mudah memadat, sehingga memfasilitasi pertumbuhan akar yang lebih baik. Dalam kasus ini, kalsium berkontribusi pada stabilitas struktur tanah dengan membantu mengikat partikel-partikel tanah bersama-sama. Ini

meningkatkan aerasi dan drainase tanah, serta mengurangi erosi.

- Kalsium, dalam bentuk kapur (CaCO_3 atau Ca(OH)_2), digunakan sebagai bahan pengapuran untuk meningkatkan pH tanah yang terlalu asam. Kondisi ini membuat pH tanah menjadi lebih netral atau sedikit alkali. Hal ini penting karena pH yang seimbang mendukung ketersediaan nutrisi bagi tanaman dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme di dalam tanah. Ini membantu menciptakan kondisi tanah yang lebih ideal bagi tanaman untuk menyerap nutrisi.
- Kalsium membantu mengurangi efek toksik dari ion-ion beracun seperti aluminium (Al^{3+}) dan hidrogen (H^+) dalam tanah asam. Meningkatkan ketersediaan nutrisi penting lainnya seperti nitrogen, fosfor, dan kalium melalui regulasi pH dan interaksi kimia dengan ion-ion tanah.
- Dalam sistem geologi, kalsium dalam batuan terlibat dalam siklus karbonat-silikat, di mana pelapukan batuan karbonat dan silikat membantu mengatur konsentrasi karbon dioksida (CO_2) dalam atmosfer. Prosesnya meliputi kondisi kalsium terlarut dalam air hujan yang mengandung asam karbonat, kemudian mengalir ke lautan dan berpartisipasi dalam pembentukan kalsium karbonat. Setelah organisme laut mati, kerang dapat terkompresi menjadi batu kapur. Siklus ini terus terjadi sehingga menjaga jumlah kalsium di alam tetap ada yang kemudian disebut dengan siklus kalsium.
- Kalsium berperan dalam pembentukan tanah, karena melalui pelapukan batuan yang mengandung kalsium menghasilkan ion-ion kalsium yang dilepaskan ke tanah, menjadi bagian penting dari kesuburan tanah.
- Ion kalsium (Ca^{2+}) di tanah berasal dari pelapukan batuan kalsium atau aplikasi bahan kapur. Ion ini

- tersedia dalam larutan tanah untuk diserap oleh akar tanaman.
- Dalam hubungan antara kalsium dengan tanah, batuan yang mengandung kalsium (seperti batu kapur) terdegradasi oleh air, udara, dan aktivitas biologis, menghasilkan ion kalsium yang memasuki tanah.
 - Tanah yang berasal dari pelapukan batuan karbonat biasanya memiliki kandungan kalsium tinggi, pH netral hingga basa, dan sangat baik untuk pertanian.

10.4.2 Sumber Kalsium di Tanah

Kalsium dalam tanah dapat ditemui dalam berbagai contoh misalnya mineral seperti kalsit (CaCO_3) yang merupakan komponen utama batu kapur yang terbentuk dari pengendapan material organik seperti cangkang hewan laut dan marmer, dan dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) yang merupakan batuan karbonat yang mengandung kalsium dan magnesium yang berasal dari pelapukan batuan. Selain itu kalsium dapat ditemukan dalam mineral anhidrit (CaSO_4) dan gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) yang merupakan batuan dengan sumber utama kalsium sulfat, ditemukan dalam batuan sedimen evaporit. Gipsum adalah senyawa yang mengandung kalsium dan sulfur. Meskipun tidak meningkatkan pH tanah, gipsum berfungsi untuk memperbaiki struktur tanah, meningkatkan aerasi, dan menyediakan kalsium yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman.

Keberadaan kalsium di tanah dapat berasal dari pupuk yang digunakan dalam pertanian. Misalnya: 1) kalsium nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Pupuk ini menyediakan kalsium dalam bentuk yang mudah diserap tanaman sekaligus menyediakan nitrogen; 2) Kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Pupuk ini digunakan untuk menyediakan kalsium sekaligus fosfor bagi tanaman; 3) kalsium klorida

(CaCl_2): garam ini menjadi sumber kalsium yang larut air yang sering digunakan untuk aplikasi cepat pada tanaman yang menunjukkan defisiensi kalsium.

Kalsium pada tanah juga dapat berasal dari jerami padi dan sisa tanaman. Mekanismenya yaitu ketika terurai, residu tanaman yang kaya kalsium dapat melepaskan kalsium ke tanah. Selain itu kompos dan pupuk kandang menjadi sumber kalsium di tanah. Pupuk organik dari bahan seperti kotoran hewan atau kompos dari limbah hijau dapat menjadi sumber tambahan kalsium dalam tanah akibat adanya penguraian pada material tersebut. Material lain yang menjadi sumber ditemukannya kalsium di tanah yaitu *biochar*, yang merupakan arang dan abu dari pembakaran kayu atau biomassa yang mengandung kalsium karbonat. Beberapa mikroorganisme berperan dalam pelarutan mineral yang mengandung kalsium, membantu melepaskan ion kalsium ke tanah.

Bidang industri menjadi salah satu penyumbang kalsium di tanah. Misalnya: 1) Bubuk Batu Kapur/*Limestone Dust*: Sisa dari proses penambangan batu kapur digunakan untuk menambah kalsium di tanah; 2) *Slag* Baja: Produk sampingan dari industri baja yang mengandung kalsium silikat (CaSiO_3) dan bermanfaat untuk meningkatkan kandungan kalsium serta memperbaiki pH tanah; 3) Cangkang Hewan Laut: Seperti kerang, kepiting, dan tiram yang dihancurkan, mengandung kalsium karbonat yang dapat memperbaiki kandungan kalsium di tanah.

Kalsium di alam dapat berupa kalsium yang terlarut dalam air dan berupa ion Ca^{2+} . Ion kalsium terlarut dapat langsung diserap oleh akar tanaman, mendukung berbagai fungsi fisiologis seperti pembentukan dinding sel dan transportasi nutrisi. Sedangkan dalam daerah dengan air irigasi kaya kalsium, seperti daerah berkapur,

aliran air tersebut dapat membawa ion kalsium yang akan tersimpan di tanah secara alami. Selain itu hal ini akan berpengaruh pada kandungan ion Ca^{2+} di dalam air. Di daerah seperti Kota Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur, air tanah yang sering digunakan untuk semua aktivitas manusia memiliki kandungan kapur yang cukup tinggi dibandingkan dengan daerah-daerah lain di Provinsi NTT. Hal ini disebabkan lapisan batuan yang ada pada daerah Kota Kupang merupakan wilayah dengan kandungan batu kapur yang cukup tinggi (Kadang & Ola, 2021). Dalam siklus hidrologi, air hujan dapat membawa ion kalsium dari atmosfer atau dari pelarutan batuan kapur, terutama di daerah yang memiliki batuan karbonat. Selain itu, air yang mengalir melalui batuan kapur atau dolomit dapat membawa ion kalsium ke tanah yang dilaluinya.

10.4.3 Siklus Kalsium

Siklus kalsium adalah proses alami yang menggambarkan pergerakan kalsium (Ca) melalui berbagai bentuk dan lingkungan di Bumi, dari batuan hingga organisme hidup, dan kembali lagi ke bentuk mineral. Kalsium adalah elemen penting dalam ekosistem, berperan dalam pembentukan mineral, struktur sel, dan proses biokimia. Siklus batuan dapat meliputi beberapa tahapan diantaranya:

- a. Pelarutan Batuan: Siklus kalsium dimulai ketika batuan kapur atau mineral kalsium karbonat (CaCO_3) terlarut dalam air hujan atau air tanah yang mengandung asam karbonat. Proses ini menghasilkan ion kalsium (Ca^{2+}) dan ion bikarbonat (HCO_3^-) yang terlarut dalam air.
- b. Transportasi ke Laut: Ion kalsium yang terlarut ini kemudian dibawa oleh aliran air sungai menuju lautan. Di laut, ion kalsium bergabung dengan ion

- karbonat (CO_3^{2-}) untuk membentuk kalsium karbonat (CaCO_3), yang dapat membentuk berbagai struktur geologis seperti karang dan kerang.
- c. **Pembentukan Batuan Sedimen:** Setelah organisme laut seperti moluska dan karang mati, kerang atau rangka mereka akan terkubur dalam sedimen laut. Proses diagenesis terjadi ketika sedimen ini terkompresi dan membentuk batuan sedimen seperti batu kapur. Diagenesis sendiri adalah proses perubahan yang terjadi pada sedimen atau batuan sedimen setelah deposisi, yang berlangsung pada suhu dan tekanan yang relatif rendah, berbeda dengan proses metamorfisme yang terjadi pada kondisi yang lebih ekstrem.
 - d. **Erosi dan Kembali ke Daratan:** Erosi batuan kapur di daratan juga berkontribusi pada siklus ini. Mineral CaCO_3 dapat terurai oleh asam karbonat dalam tanah, menghasilkan ion kalsium yang meresap ke dalam tanah dan diserap oleh tanaman.
 - e. **Penyerapan oleh organisme:** Tanaman menyerap ion Ca^{2+} dari tanah melalui akar. Kalsium diperlukan untuk pembentukan dinding sel dan fungsi fisiologis lainnya. Selanjutnya hewan mengonsumsi tanaman atau organisme lain yang mengandung kalsium. Kalsium penting untuk pembentukan tulang, gigi, dan fungsi otot.
 - f. **Transfer melalui jaringan makanan:** Kalsium berpindah dari tanaman ke herbivora, kemudian ke karnivora melalui rantai makanan. Setelah organisme mati, kalsium dalam tubuhnya kembali ke tanah melalui dekomposisi.
 - g. **Dekomposisi:** Ketika tumbuhan dan hewan mati, mereka akan terurai, mengembalikan ion kalsium ke dalam tanah. Proses ini juga mendukung siklus dengan mengembalikan kalsium ke lingkungan.
- Siklus Kalsium sangat penting dalam menjaga eksistensi kalsium dalam tanah. Berikut dijelaskan beberapa signifikansi kalsium di alam.

- Ekosistem Darat: Menyediakan kalsium untuk kesuburan tanah dan kebutuhan tanaman.
- Ekosistem Laut: Berperan dalam siklus karbon global melalui pembentukan endapan karbonat.
- Keberlanjutan Kehidupan: Menjaga keseimbangan kalsium dalam biosfer penting untuk kesehatan ekosistem dan organisme
- Nutrisi Tanaman: Kalsium adalah makronutrien sekunder yang penting bagi tanaman, berkontribusi terhadap kekakuan dinding sel dan membantu dalam proses metabolisme seperti fotosintesis.
- Keseimbangan Ekosistem: Siklus kalsium berperan dalam menjaga keseimbangan pH tanah serta mempengaruhi kelarutan nutrisi lain, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman dan kesehatan ekosistem secara keseluruhan.
- Interaksi Geologis: Siklus ini juga berkaitan dengan proses geologis lainnya seperti tektonik dan siklus karbon, menunjukkan bagaimana unsur-unsur saling berinteraksi di bumi.

10.4.4 Fungsi dan Peran Kalsium dalam Proses Pertukaran Ion

Kalsium memiliki peran penting dalam proses pertukaran ion, yang merupakan mekanisme di mana ion-ion dalam larutan dipertukarkan dengan ion-ion yang terikat pada permukaan partikel tanah atau resin penukar ion. Berikut adalah penjelasan mengenai fungsi dan peran kalsium dalam proses ini:

1. Kation Penting dalam Pertukaran Ion

Kalsium (Ca^{2+}) merupakan salah satu kation yang paling signifikan dalam tanah. Dalam proses pertukaran ion, kalsium dapat menggantikan ion lain, seperti natrium (Na^+) dan magnesium (Mg^{2+}), yang terikat pada partikel tanah. Proses ini

meningkatkan kesuburan tanah dengan menyediakan nutrisi yang diperlukan oleh tanaman. Kalsium memiliki muatan positif ganda (Ca^{2+}), yang membuatnya lebih kuat mengikat partikel tanah dibandingkan dengan kation monovalen seperti natrium (Na^+) atau kalium (K^+). Hal ini menyebabkan ion kalsium dapat menetralkan muatan negatif pada permukaan partikel tanah, membantu menjaga stabilitas agregat tanah.

Manfaat lain dari pertukaran ion ini adalah tanah memiliki partikel bermuatan negatif (seperti lempung dan bahan organik), yang menarik kation bermuatan positif, termasuk kalsium, magnesium (Mg^{2+}), kalium (K^+), dan natrium (Na^+). Kalsium membantu menjaga keseimbangan muatan listrik di tanah, yang esensial untuk penyerapan nutrisi oleh tanaman.

2. Meningkatkan Ketersediaan Nutrisi

Kalsium berperan dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi lain di dalam tanah. Ketika kalsium bertukar tempat dengan ion lain, maka akan membantu melepaskan nutrisi penting seperti kalium (K^+) dan magnesium (Mg^{2+}) dari kompleks tanah, sehingga lebih mudah diserap oleh akar tanaman. Dalam proses pertukaran kation, kalsium yang teradsorpsi pada permukaan partikel tanah dapat dilepaskan ke larutan tanah. Tanaman kemudian menyerap kalsium dari larutan ini melalui akar. Pertukaran kation memungkinkan kalsium tetap tersedia di tanah tanpa tercuci sepenuhnya oleh air hujan atau irigasi.

3. Stabilitas Struktur Tanah

Kalsium berkontribusi pada stabilitas struktur tanah melalui proses pengikatan partikel-partikel tanah. Dengan meningkatkan agregasi partikel tanah,

kalsium membantu memperbaiki aerasi dan drainase tanah, yang sangat penting untuk pertumbuhan akar dan kesehatan tanaman secara keseluruhan. Mekanismenya agregat yang stabil meningkatkan aerasi tanah, drainase, dan kemampuan tanah menyimpan air, sehingga menciptakan kondisi yang lebih baik bagi pertumbuhan akar.

4. Mengurangi Keasaman Tanah

Dalam konteks pertukaran ion, kalsium dapat digunakan untuk menetralkan keasaman tanah. Ketika kalsium ditambahkan ke tanah asam, spesi ini dapat menggantikan ion hidrogen (H^+), sehingga mengurangi tingkat keasaman dan meningkatkan pH tanah. Ini menciptakan kondisi yang lebih baik untuk pertumbuhan tanaman.

5. Penggunaan dalam Resin Penukar Ion

Kalsium juga berperan dalam sistem resin penukar ion, di mana akan dipertukarkan dengan ion lain dalam larutan. Dalam aplikasi pemurnian air, resin penukar kation dapat digunakan untuk menghilangkan ion kalsium dari air sadah dan menggantinya dengan ion natrium (Na^+). Proses ini berguna untuk mengurangi kerak pada peralatan pemanas dan meningkatkan kualitas air.

6. Regenerasi Resin

Setelah resin penukar ion jenuh dengan ion kalsium, proses regenerasi diperlukan untuk mengembalikan kemampuan resin tersebut. Ini dilakukan dengan menggunakan larutan yang kaya akan ion natrium, sehingga kalsium dapat digantikan kembali oleh natrium.

7. Interaksi dengan Nutrisi Lain

Kalsium memengaruhi ketersediaan dan interaksi nutrisi lain di tanah. Sisi positif dari interaksi ini adalah membantu penyerapan nitrogen (N), magnesium (Mg), dan fosfor (P). Namun dampak negatifnya adalah jika terlalu tinggi, kalsium dapat mengurangi ketersediaan kalium (K), magnesium (Mg), dan zat besi (Fe) karena kompetisi dalam proses pertukaran kation.

8. Mendukung Aktivitas Mikroorganisme Tanah

Kalsium menciptakan kondisi yang optimal untuk mikroorganisme tanah, terutama yang berperan dalam fiksasi nitrogen dan dekomposisi bahan organik. Mikroorganisme ini membantu siklus nutrisi, sehingga meningkatkan kesuburan tanah.

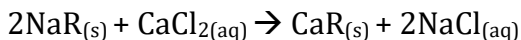
Mekanisme pertukaran ion terjadi melalui proses, ketika larutan yang mengandung ion bersentuhan dengan resin penukar ion, ion dalam larutan akan terikat pada gugus fungsional pada resin, sementara ion dari resin akan dilepaskan ke dalam larutan. Proses ini terjadi dalam jumlah ekuivalen, sehingga jumlah ion yang ditukarkan sama antara resin dan larutan. Proses pertukaran ion dapat dibagi menjadi beberapa tahap: 1) Tahap Layanan (*Service*): Di mana reaksi pertukaran ion terjadi secara aktif; 2) Tahap Pencucian Balik (*Backwash*): Membersihkan resin dari kontaminan; 3) Tahap Regenerasi: Mengembalikan kapasitas pertukaran resin dengan menggunakan larutan asam atau basa untuk menggantikan ion yang telah dipertukarkan; 4) Tahap Pembilasan: Menghilangkan sisa-sisa larutan regenerasi dari resin.

10.4.5 Faktor yang Mempengaruhi Pertukaran Ion

Beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi proses ini meliputi: 1) pH Larutan: pH dapat mempengaruhi kapasitas penukaran resin; beberapa resin berfungsi lebih baik dalam kondisi asam atau basa tertentu; 2) Kecepatan aliran: kecepatan aliran larutan yang tinggi dapat mengurangi waktu kontak antara ion dan resin, sehingga mengurangi efisiensi pertukaran; 3) Konsentrasi ion lain: Persaingan antara ion-ion di larutan memengaruhi hasil akhir; 4) Ukuran pori adsorben: Material dengan pori besar meningkatkan akses ion Ca^{2+} ; 5) Suhu dan waktu kontak: Suhu tinggi dan waktu kontak lebih lama dapat meningkatkan efisiensi pertukaran ion.

Contoh Reaksi Pertukaran Ion

- Reaksi Pertukaran Kation:



Dalam reaksi ini, kalsium dari larutan digantikan oleh natrium dari resin

Reaksi Pertukaran Anion:



Di sini, anion sulfat menggantikan klorida pada resin

Keterangan: R adalah permukaan resin atau material adsorben.

Saat terjadi mekanisme pertukaran ion, akan terjadi interaksi elektrostatik antara muatan positif ion kalsium (Ca^{2+}) dan muatan negatif pada permukaan material memungkinkan ikatan sementara. Proses ini berlanjut hingga mencapai kesetimbangan dinamis antara ion-ion di larutan dan permukaan adsorben.

Aplikasi Pertukaran Ion

Pertukaran ion banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk:

- Pengolahan air untuk menghilangkan kesadahan.
- Proses demineralisasi air untuk menghasilkan air murni.

- Pengolahan limbah cair untuk mengurangi kontaminan

10.5 Kalsium dan Tanaman

10.5.1 Fungsi Kalsium bagi Tanaman

Kalsium adalah komponen penting dalam pembentukan dinding sel tanaman. Dinding sel yang kuat membantu menjaga bentuk dan integritas tanaman, serta melindungi dari kerusakan fisik dan serangan patogen. Kehadiran kalsium meningkatkan stabilitas dinding sel, sehingga tanaman menjadi lebih tahan terhadap stres lingkungan. Beberapa contoh peran kalsium terhadap tumbuhan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penyusun Dinding Sel Tanaman

Kalsium berperan sebagai komponen utama dinding sel dalam bentuk kalsium pektat atau yang sering disebut sebagai komponen struktural dalam dinding sel tanaman. Fungsi ini sangat penting untuk memperkuat struktur sel dan mempertahankan integritas sel dan mencegah kerusakan sel akibat tekanan osmotik atau mekanis. Dengan kata lain, dinding sel yang kuat dan kokoh sangat penting untuk menjaga bentuk tanaman, melindungi dari kerusakan, serta menahan tekanan air. Kalsium membantu meningkatkan integritas dan stabilitas dinding sel, sehingga tanaman lebih tahan terhadap serangan hama dan penyakit.

2. Pertumbuhan akar

Kalsium mendorong pembentukan dan pertumbuhan akar yang sehat. Akar yang kuat sangat penting untuk penyerapan air dan nutrisi dari tanah, yang mendukung pertumbuhan keseluruhan tanaman. Kelemahan akar akibat kekurangan kalsium dapat menghambat kemampuan tanaman untuk mendapatkan nutrisi. Kalsium berperan dalam pembelahan dan pemanjangan sel di daerah

meristem (ujung akar dan pucuk) serta merangsang perkembangan akar yang sehat dan mencegah kerusakan. Kekurangan kalsium sering mengakibatkan akar pendek, lemah, dan terhambat. Fungsi akar adalah untuk mencari arah sumber makanan sehingga pertumbuhan akar yang sehat akan menjadi penentu banyaknya asupan makanan yang dapat diserap dan disebarkan ke seluruh bagian tumbuhan.

3. Mengatur transpor nutrisi

Kalsium berperan dalam pengaturan transportasi air dan nutrisi di dalam tanaman. Kalsium membantu mengatur aliran nutrisi dari akar ke bagian-bagian lain tanaman, memastikan bahwa semua bagian menerima cukup nutrisi untuk pertumbuhan yang optimal. Ini memastikan bahwa setiap bagian tanaman menerima nutrisi yang cukup untuk pertumbuhan yang seimbang. Kalsium juga membantu dalam translokasi karbohidrat hasil fotosintesis ke berbagai jaringan tanaman. Pada proses ini, kalsium membantu transportasi hara di dalam tanaman melalui xilem dan meningkatkan permeabilitas membran sel, sehingga memfasilitasi pergerakan ion-ion penting. Di sini permeabilitas membran sel adalah kemampuan membran sel untuk mengatur pergerakan molekul atau ion yang masuk dan keluar dari sel atau organel di dalamnya. Membran sel memiliki sifat selektif permeabel (semi-permeabel), yang berarti hanya molekul tertentu yang dapat melewatinya, sedangkan yang lain dibatasi atau dicegah. Hal ini akan menyebabkan tumbuhan akan terhindar dari kerusakan molekuler.

4. Aktivasi enzim dan proses metabolisme

Kalsium berperan sebagai aktivator enzim dalam berbagai proses metabolisme, seperti, fotosintesis, sintesis protein dan proses transportasi zat hara dan air. Pada proses fotosintesis, kalsium dapat meningkatkan konsentrasi klorofil dalam

daun. Klorofil yang lebih tinggi jumlahnya memungkinkan lebih banyak cahaya yang dapat diserap untuk fotosintesis, menghasilkan lebih banyak energi bagi tanaman dan cadangan makanan akan semakin banyak dihasilkan oleh tumbuhan. Sehingga pemupukan dengan kalsium dapat berdampak positif pada hasil panen.

Peran kalsium dalam sintesis protein yaitu kalsium berfungsi sebagai *second messenger* dalam transduksi sinyal seluler. Ketika ada rangsangan (seperti hormon atau faktor pertumbuhan), konsentrasi kalsium intraseluler dapat meningkat. Peningkatan kalsium ini mengaktifkan protein seperti *calmodulin* dan protein kinase. Aktivasi ini mengatur proses transkripsi DNA menjadi mRNA dan translasi mRNA menjadi protein. Kalsium mengaktifkan protein seperti *calcium-dependent protein kinase* (CaMK), yang kemudian memfosforilasi faktor transkripsi tertentu. Aktivasi faktor transkripsi ini merangsang ekspresi gen yang diperlukan untuk sintesis protein. Selain itu kalsium dapat mempengaruhi kerja ribosom melalui faktor translasi yang diatur oleh Ca^{2+} . Proses ini memungkinkan translasi mRNA menjadi protein berlangsung lebih efisien.

5. Mengurangi kerontokan buah

Kalsium juga membantu mengurangi kerontokan bunga dan buah, yang sangat penting selama fase generatif tanaman. Dengan cukup kalsium, tanaman dapat mempertahankan bunga dan buahnya hingga masa panen, meningkatkan hasil secara keseluruhan. Kalsium membantu menjaga stabilitas membran sel dengan mengikat fosfolipid dalam membran. Hal ini mencegah kebocoran ion dan molekul penting dari sel, terutama dalam kondisi stres lingkungan seperti kekeringan atau cekaman garam. Sehingga sangat membantu mencegah keguguran bunga dan buah.

6. Detoksifikasi ion beracun

Kalsium berperan dalam menetralkan ion-ion beracun seperti aluminium (Al^{3+}) dan natrium (Na^+) pada kondisi tanah masam atau salin. Di sini Ca^{2+} bersaing dengan ion-ion tersebut untuk berikatan dengan dinding sel atau membran plasma, sehingga melindungi sel dari kerusakan. Mekanismenya yaitu kalsium dapat berinteraksi dengan ion aluminium untuk membentuk kompleks yang tidak toksik. Ketika kalsium tersedia dalam jumlah yang cukup, maka dapat mengikat aluminium, sehingga mengurangi konsentrasi ion aluminium yang bebas dan beracun di dalam sel tanaman. Proses ini membantu mencegah masuknya aluminium ke dalam jaringan tanaman, mengurangi efek toksisitasnya. Tanaman yang terpapar cekaman aluminium sering kali mengeksudasi asam organik seperti asam sitrat, asam malat, dan asam oksalat dari akar mereka. Asam-asam ini memiliki kemampuan untuk mengkhelat (*chelating*) ion aluminium, yang berarti mereka dapat mengikat aluminium dan membentuk kompleks larut yang lebih aman. Kalsium mendukung proses ini dengan memfasilitasi eksudasi asam organik tersebut, sehingga meningkatkan kemampuan tanaman untuk menetralkan efek negatif aluminium.

7. Pengaturan stomata

Kalsium berperan dalam pengaturan stomata melalui mekanisme sinyal kalsium yang memengaruhi keseimbangan osmotik di sel penjaga stomata. Hal ini penting dalam pengaturan transpirasi dan penyerapan CO_2 selama fotosintesis. Sel penjaga (*guard cells*) yang mengelilingi stomata sangat dipengaruhi oleh konsentrasi kalsium di dalam sitoplasma. Kalsium berfungsi sebagai sinyal yang memicu perubahan turgor pada sel penjaga. Ketika konsentrasi kalsium meningkat, sel penjaga akan mengalami peningkatan turgor, yang

menyebabkan stomata terbuka. Sebaliknya, penurunan konsentrasi kalsium dapat menyebabkan penutupan stomata. Selain itu, kalsium berinteraksi dengan hormon tanaman, terutama asam absisik (ABA), yang terlibat dalam respon tanaman terhadap cekaman lingkungan seperti kekeringan. Ketika tanaman mengalami stres, ABA akan meningkat dan memicu peningkatan konsentrasi kalsium di dalam sel penjaga. Hal ini berkontribusi pada penutupan stomata untuk mengurangi kehilangan air melalui transpirasi.

8. Pembentukan kompleks dengan asam organik tanah

Kalsium membantu menetralkan asam-asam organik di dalam tanah, yang bisa bersifat meracuni bagi tanaman. Dengan menetralkan asam ini, kalsium menciptakan lingkungan yang lebih baik bagi pertumbuhan tanaman. Kalsium dapat membentuk kompleks dengan asam-asam organik yang ada di dalam tanah, seperti asam humat dan asam fulvat. Proses ini membantu mengurangi potensi racun dari asam-asam tersebut dan meningkatkan stabilitas struktur tanah. Dengan demikian, kalsium tidak hanya berfungsi untuk menetralkan pH tetapi juga berkontribusi pada kesehatan keseluruhan tanah.

9. Peran dalam metabolisme seluler

Kalsium berfungsi sebagai kofaktor enzim dalam berbagai reaksi metabolisme, seperti aktivasi enzim yang berperan dalam degradasi ATP untuk menghasilkan energi. Selain itu kalsium memiliki peran dalam regulasi aktivitas enzim pada jalur metabolisme primer dan sekunder. Kalsium bertindak sebagai kofaktor untuk beberapa enzim, yaitu molekul non-protein yang diperlukan agar enzim dapat berfungsi optimal. Peran ini melibatkan stabilisasi struktur enzim atau berpartisipasi langsung dalam reaksi katalitik. Contohnya enzim amilase memecah pati menjadi maltosa. Kalsium membantu mempertahankan struktur aktif enzim

dan meningkatkan stabilitasnya. Reaksi dengan protease bergantung pada Ca^{2+} untuk aktivitas hidrolisis protein. Selain itu pada saat proses pemecahan fosfolipid ion Ca^{2+} diperlukan sebagai katalis.

Kalsium berperan sebagai aktivator enzim, di mana ion Ca^{2+} meningkatkan aktivitas enzim melalui pengikatan spesifik pada situs alosterik atau katalitik. Pengikatan ini menyebabkan perubahan konformasi enzim sehingga enzim menjadi aktif dan mampu mengikat substrat dengan lebih efisien. Contohnya Kalsium mengaktifkan Ca^{2+} -ATPase yang berperan dalam pemompaan ion kalsium melintasi membran sel atau proses lain yaitu Ca^{2+} mengaktifkan enzim troponin kinase yang berperan dalam kontraksi serat otot.

10. Meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah

Pengapuran tanah dengan kalsium juga dapat merangsang aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat di dalam tanah. Mikroorganisme ini berperan dalam proses dekomposisi bahan organik dan penguraian unsur hara, sehingga mendukung kesuburan tanah secara keseluruhan. Aktivitas mikroba yang meningkat akan membantu mengurai bahan organik menjadi nutrisi yang lebih mudah diserap oleh tanaman.

11. Pengaktifan *rhizobia*

Kalsium juga penting untuk pengaktifan bakteri bintil akar (*rhizobia*) pada tanaman legum. Mikroorganisme ini berperan dalam proses fiksasi nitrogen, yang sangat bermanfaat bagi kesuburan tanah. Kehadiran kalsium dalam tanah dapat meningkatkan kemampuan bakteri ini untuk menginfeksi akar tanaman dan membentuk bintil akar yang berfungsi sebagai tempat fiksasi nitrogen dari atmosfer. Kalsium membantu dalam proses pembentukan nodul, yang merupakan struktur penting di mana fiksasi nitrogen terjadi. Kalsium

membantu dalam proses ini dengan memperkuat interaksi antara tanaman dan bakteri, sehingga memfasilitasi pembentukan bintil akar yang efektif.

12. Pencegahan penyakit fisiologi

Kalsium membantu mencegah penyakit fisiologis pada tanaman, seperti busuk ujung buah (*blossom end rot*) pada tomat, cabai, dan semangka, *tip burn* pada daun tanaman kubis dan selada yang disebabkan oleh defisiensi kalsium yang menghambat perkembangan sel di area tersebut.

13. Efek kekurangan kalsium bagi tanaman

- Kekurangan kalsium menyebabkan penghambatan pertumbuhan terutama pada bagian muda seperti pucuk dan ujung akar. Hal ini karena kalsium penting untuk pembelahan dan pemanjangan sel di jaringan meristematik (ujung akar dan pucuk). Hal ini juga akibat sel tidak dapat membentuk dinding sel yang kuat, sehingga jaringan menjadi lemah.
- Kekurangan kalsium menyebabkan nekrosis (kematian jaringan) pada ujung daun, tepi daun, dan ujung pucuk. Ciri yang terjadi pada tumbuhan adalah daun muda sering terlihat menggulung, kaku, atau mengalami pencoklatan pada ujungnya. Contohnya pada tanaman kubis, kekurangan kalsium menyebabkan *tip burn* pada tepi daun.
- Kekurangan kalsium menyebabkan pertumbuhan akar terhambat, ujung akar tampak membengkak atau berbentuk abnormal, serta kurang mampu menyerap air dan nutrisi.
- Kalsium berperan dalam stabilisasi membran plasma. Kekurangan kalsium menyebabkan membran sel menjadi rapuh, mudah bocor, dan menyebabkan kehilangan ion-ion penting dari sel.

- Kekurangan kalsium membuat tumbuhan lebih rentan terhadap stres abiotik (kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem) serta serangan patogen. Hal ini karena kalsium berperan dalam sistem sinyal seluler untuk merespon kondisi stress.
- Pada tanaman buah dan sayuran, kekurangan kalsium menyebabkan kualitas buah menurun karena kulit buah tipis dan mudah pecah dan buah mudah busuk saat penyimpanan. Ciri-cirinya pada tanaman sayuran daun, daun menjadi keriting, rapuh, dan bercak-bercak.
- Kalsium berperan sebagai *second messenger* dalam transduksi sinyal seluler. Sehingga kekurangan kalsium mengganggu koordinasi berbagai proses metabolisme, seperti respons terhadap hormon dan stres lingkungan.

Berikut dijelaskan berbagai penyebab kekurangan kalsium pada tanah dan tumbuhan yaitu: 1) ketersediaan kalsium rendah di dalam tanah; 2) pH tanah yang rendah (asam) akan menyebabkan penghambatan penyerapan kalsium; 3) Persaingan ion seperti kelebihan magnesium (Mg^{2+}) atau kalium (K^+) dalam tanah; dan 4) Gangguan transportasi kalsium akibat masalah sistem pengangkutan air pada tumbuhan; 5) Bahan organik membantu menyediakan kalsium melalui proses dekomposisi. Sehingga kekurangan dekomposisi kalsium menyebabkan kurangnya kalsium di tanah; 6) pemupukan berlebih oleh kalium dan magnesium akan menyebabkan penghambatan penyerapan terhadap kalsium; 7) Tanah berpasir memiliki kemampuan menyimpan nutrisi yang rendah, termasuk kalsium.

Menghadapi berbagai permasalahan tersebut maka ada beberapa langkah yang perlu dibuat untuk bisa mencegah kondisi kekurangan kalsium itu diantaranya: 1) Pemupukan menggunakan sumber kalsium seperti

kapur pertanian (CaCO_3), dolomit, atau kalsium nitrat; 2) Menjaga pH tanah pada kisaran optimal (6-7) agar penyerapan kalsium lebih efektif; 3) Pemberian irigasi yang cukup karena kalsium ditransportasikan melalui aliran air di dalam xilem; 4) Menghindari kelebihan unsur hara lain yang menghambat penyerapan kalsium.

10.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Kalsium

1. Pengaruh pH Tanah terhadap Kalsium

Faktor pH tanah merupakan faktor penting yang mempengaruhi ketersediaan kalsium (Ca) dan unsur hara lainnya dalam tanah. Berikut adalah beberapa pengaruh pH terhadap ketersediaan kalsium tanah.

- Kalsium umumnya lebih tersedia pada pH tanah netral hingga sedikit basa (pH 6,0 - 7,5). Pada pH yang lebih rendah (asam), kalsium cenderung terikat dalam bentuk senyawa yang kurang larut, sehingga sulit diserap oleh tanaman. Sebaliknya, pada pH tinggi, kalsium dapat membentuk senyawa kompleks dengan fosfat, seperti kalsium fosfat, yang juga sulit larut dan tidak tersedia bagi tanaman (Siswanto, 2019).
- pH tanah mempengaruhi interaksi antara kalsium dan unsur hara lain. Pada pH rendah, ion hidrogen (H^+) yang tinggi dapat mengikat kalsium dan mengurangi ketersediaannya. Selain itu, pada kondisi asam, unsur-unsur seperti aluminium (Al) dan mangan (Mn) dapat menjadi lebih larut dan bersifat toksik bagi tanaman, sementara kalsium yang seharusnya berfungsi sebagai penyeimbang menjadi kurang tersedia
- Kalsium berperan dalam pembentukan agregat tanah dan meningkatkan struktur tanah. Pada pH yang optimal, kalsium membantu

meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), yang penting untuk menjaga keseimbangan nutrisi di dalam tanah. Namun, pada pH rendah, agregasi tanah dapat terganggu, sehingga mempengaruhi aerasi dan drainase tanah

- Pengapuran dengan menggunakan kapur pertanian (kalsium karbonat) adalah metode umum untuk meningkatkan pH tanah asam. Proses ini tidak hanya menaikkan pH tetapi juga meningkatkan ketersediaan kalsium di dalam tanah. Penambahan kalsium melalui pengapuran dapat membantu menetralkan keasaman dan memperbaiki kondisi pertumbuhan tanaman secara keseluruhan
- Kondisi pH yang tidak seimbang dapat menyebabkan penurunan kesuburan tanah dalam jangka panjang. Tanah dengan pH rendah sering kali mengalami kekurangan kalsium dan unsur hara lain, yang berdampak negatif pada pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, pemantauan dan pengelolaan pH tanah sangat penting untuk memastikan bahwa kalsium dan nutrisi lainnya tetap tersedia bagi tanaman.

2. Pengaruh Kelembapan dan Suhu Tanah

Kelembapan dan suhu tanah adalah dua faktor lingkungan yang berpengaruh signifikan terhadap kandungan kalsium (Ca) dalam tanah. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai bagaimana kedua faktor ini mempengaruhi kalsium tanah.

- a. Pengaruh kelembapan tanah
 - Ketersediaan Air: Kelembapan tanah yang optimal meningkatkan ketersediaan air bagi tanaman, yang pada gilirannya mempengaruhi kemampuan tanaman untuk menyerap kalsium dari tanah. Tanah yang terlalu kering dapat menghambat penyerapan kalsium, sedangkan

kelembapan yang cukup memungkinkan ion Ca^{2+} terlarut dan tersedia untuk diserap oleh akar tanaman. Di sini kalsium (Ca^{2+}) ditransportasikan melalui aliran air tanah (aliran massa). Jika kelembapan tanah rendah (tanah kering), kalsium menjadi tidak tersedia karena ion Ca^{2+} tidak dapat bergerak ke zona perakaran tanaman.

- **Proses Pencucian:** Kelembapan yang tinggi dapat meningkatkan proses pencucian, di mana ion kalsium dapat terlarut dan terbawa keluar dari zona akar. Jika kelembapan tanah terlalu tinggi atau terjadi genangan, hal ini dapat menyebabkan hilangnya kalsium dari lapisan atas tanah, mengurangi konsentrasi kalsium yang tersedia bagi tanaman. Kalsium bersifat mudah larut dalam air, sehingga pada tanah berpasir atau curah hujan tinggi, kalsium dapat terbawa ke lapisan tanah bawah dan menjadi tidak tersedia untuk akar tanaman. Akibatnya, tanah menjadi miskin kalsium, terutama pada tanah asam atau tanah bertekstur ringan
- **Aktivitas Mikroba:** Kelembapan memengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam tanah, seperti bakteri dan fungi yang membantu dekomposisi bahan organik. Jika kelembapan optimal, dekomposisi berjalan baik, dan kalsium dapat dilepaskan ke tanah dari bahan organik. Namun, kelembapan terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat aktivitas mikroba, sehingga pelepasan kalsium dari bahan organik menjadi lebih lambat.

- Interaksi dengan Unsur Hara Lain: Kelembapan tanah juga mempengaruhi interaksi antara kalsium dan unsur hara lain. Dalam kondisi kelembapan yang optimal, kalsium dapat bersaing dengan ion lain seperti magnesium (Mg) dan kalium (K) untuk diserap oleh tanaman. Namun, kelembapan yang berlebihan dapat menyebabkan terjadinya pengendapan atau kompleksasi dengan unsur lain, sehingga mengurangi ketersediaan kalsium.
 - pH Tanah: Pada kondisi kelembapan tinggi, akumulasi ion H^+ (hidrogen) di tanah meningkat karena proses pencucian basa (kalsium, magnesium, dan kalium). Hal ini menyebabkan penurunan pH tanah (tanah menjadi asam), yang berakibat pada penurunan ketersediaan kalsium untuk tanaman.
- b. Pengaruh suhu
- Reaksi Kimia: Suhu tanah mempengaruhi laju reaksi kimia dalam tanah, termasuk reaksi yang melibatkan kalsium. Pada suhu yang lebih tinggi, laju reaksi kimia cenderung meningkat, sehingga dapat meningkatkan kelarutan kalsium dalam tanah. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penguapan air yang berlebihan, mengakibatkan peningkatan konsentrasi ion-ion lain dan mengurangi ketersediaan kalsium.
 - Pelapukan mineral: Suhu yang tinggi mempercepat proses pelapukan mineral dalam tanah. Pelapukan mineral primer seperti kalsit ($CaCO_3$) atau dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) melepaskan ion Ca^{2+} ke dalam larutan tanah. Namun, pada suhu

rendah, laju pelapukan mineral melambat, sehingga kalsium lebih sedikit tersedia di tanah.

- **Transpirasi Tanaman:** Suhu juga mempengaruhi laju transpirasi pada tanaman. Pada suhu tinggi, transpirasi meningkat, yang dapat meningkatkan kebutuhan tanaman akan air dan nutrisi, termasuk kalsium. Jika pasokan air tidak mencukupi, maka penyerapan kalsium akan terhambat.
- **Aktivitas mikroba:** Aktivitas mikroorganisme dalam tanah meningkat seiring dengan peningkatan suhu hingga batas optimal (sekitar 25–30°C). Mikroorganisme membantu dekomposisi bahan organik yang melepaskan nutrisi, termasuk kalsium. Pada suhu yang terlalu rendah, aktivitas mikroba terhambat, sehingga pelepasan kalsium dari bahan organik menjadi lebih lambat.
- **Pengaruh terhadap Mikroorganisme:** Suhu tanah yang optimal mendukung aktivitas mikroorganisme pengurai di dalam tanah. Mikroorganisme ini berperan dalam proses dekomposisi bahan organik yang dapat melepaskan kalsium ke dalam bentuk yang lebih tersedia bagi tanaman. Namun, suhu ekstrem (terlalu dingin atau terlalu panas) dapat menghambat aktivitas mikroorganisme tersebut.
- **Penguapan air:** suhu tinggi menyebabkan peningkatan penguapan air tanah, yang dapat mengakibatkan kelembapan tanah menurun. Dalam kondisi tanah kering, kalsium menjadi sulit bergerak ke zona perakaran dan tidak dapat diserap oleh tanaman. Sebaliknya, pada suhu optimal

dengan kelembapan yang cukup, pergerakan kalsium menuju akar tanaman akan lebih lancar.

- Pencucian kalsium: Suhu tinggi yang disertai curah hujan atau kelembapan tinggi dapat meningkatkan proses pencucian kalsium. Hal ini terjadi lebih cepat di tanah berpasir atau tanah yang miskin bahan organik.

Kelembapan dan suhu tanah memiliki pengaruh signifikan terhadap kandungan kalsium dalam tanah. Kelembapan yang optimal mendukung kelarutan dan penyerapan kalsium oleh tanaman, sementara kelembapan berlebih atau kekurangan dapat menyebabkan hilangnya atau berkurangnya ketersediaan kalsium. Demikian pula, suhu tanah mempengaruhi reaksi kimia dan aktivitas mikroorganisme yang berkontribusi pada kelarutan dan mobilitas kalsium di dalam tanah. Oleh karena itu, menjaga keseimbangan kelembapan dan suhu tanah sangat penting untuk memastikan bahwa kadar kalsium tetap optimal untuk pertumbuhan tanaman.

10.5.3 Pengaruh Praktik Pertanian pada Kalsium Tanah

Praktik pertanian yang tepat sangat penting untuk menjaga kandungan kalsium dalam tanah agar tetap optimal bagi pertumbuhan tanaman. Berikut adalah berbagai strategi yang dapat diterapkan oleh petani untuk mempertahankan dan meningkatkan kandungan kalsium di dalam tanah:

1. Pengapuran tanah

Tujuan metode ini adalah untuk menambah jumlah kalsium pada tanah. Penggunaan kapur dolomit (yang mengandung kalsium dan magnesium) adalah salah satu metode yang paling umum untuk meningkatkan pH tanah yang asam dan

menambah kalsium. Kapur dolomit membantu menetralkan keasaman tanah, meningkatkan ketersediaan kalsium, dan memperbaiki struktur tanah. Selain dolomit, kapur kalsit juga dapat digunakan untuk menambah kalsium tanpa menambah magnesium. Pengapuran ini dapat dilakukan dengan menyebarkan kapur secara merata di area pertanian. Alasannya yaitu kapur menaikkan pH tanah asam, sehingga kalsium menjadi lebih tersedia untuk tanaman. Cara ini juga mencegah pencucian kalsium di tanah.

2. Pemberian pupuk yang mengandung kalsium

Menggunakan pupuk yang mengandung kalsium, seperti kalsium nitrat atau gipsum (kalsium sulfat), dapat membantu meningkatkan kandungan kalsium dalam tanah. Pupuk ini tidak hanya menyediakan kalsium tetapi juga membantu memperbaiki sifat fisik tanah. Kalsium nitrat sangat mudah larut dalam air sedangkan gipsum tidak mengubah pH tanah dan cocok untuk kondisi tanah netral hingga basa. Selain itu menggunakan kulit telur yang dihancurkan sebagai pupuk alami juga dapat menjadi alternatif untuk menambah kalsium ke dalam tanah. Kulit telur kaya akan kalsium karbonat, yang dapat memperbaiki kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Aplikasinya dilakukan saat persiapan lahan atau sebagai pupuk tambahan di fase pertumbuhan aktif tanaman.

3. Pengelolaan pH tanah

Menghindari tanah asam: Kalsium tidak tersedia dalam pH yang terlalu rendah ($<5,5$). Prosesnya yaitu mengaplikasikan kapur pertanian secara berkala untuk menjaga pH tanah di kisaran 6,0–7,0 serta dilakukan pengujian pH tanah secara berkala. Cara ini akan mencegah toksisitas aluminium (Al^{3+}) dan ion hidrogen (H^+) di tanah masam.

4. Pengelolaan irigasi dan drainase

Irigasi yang terkontrol memastikan pergerakan kalsium dari tanah ke akar tanaman. Aplikasinya dengan menghindari kondisi tanah tergenang air yang mempercepat pencucian (*leaching*) kalsium. Pada tanah bertekstur ringan atau curah hujan tinggi, tambahkan bahan organik untuk meningkatkan daya simpan kalsium dalam tanah. Disini harus memastikan kelembapan tanah, karena kondisi yang optimal sangat penting untuk menjaga ketersediaan kalsium. Irigasi yang tepat membantu mencegah pencucian berlebih dari ion kalsium dan memastikan bahwa tanaman dapat menyerapnya dengan baik. Teknik penggunaan mulsa organik dapat membantu menjaga kelembapan tanah dan mengurangi penguapan, sehingga menciptakan lingkungan yang lebih baik bagi mikroorganisme yang mendukung kesehatan tanah.

5. Penambahan bahan organik

Menambahkan bahan organik seperti kompos atau pupuk hijau dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme di dalam tanah. Mikroorganisme ini berperan dalam proses dekomposisi bahan organik yang melepaskan nutrisi, termasuk kalsium, ke dalam bentuk yang tersedia bagi tanaman. Selain itu penambahan mikroba penambat nitrogen juga dapat membantu meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan akar, sehingga memfasilitasi penyerapan kalsium. Aktivitas mikroba dalam bahan organik melepaskan kalsium secara bertahap ke dalam tanah.

6. Rotasi tanaman

Melibatkan tanaman yang dapat memanfaatkan kalsium secara efisien dan mencegah penurunan kadar kalsium akibat penggunaan berulang oleh tanaman yang sama. Cara lain adalah mengurangi erosi tanah yang dapat menghilangkan kalsium dan menghindari tanaman seperti *clover* atau alfalfa

membantu meningkatkan bahan organik tanah. Selain itu, mengimplementasikan rotasi tanaman dengan spesies legum seperti kedelai atau kacang hijau dapat meningkatkan kandungan kalsium dalam tanah. Tanaman legum memiliki kemampuan untuk memperbaiki nitrogen dan meningkatkan kesuburan tanah, yang pada gilirannya dapat mendukung penyerapan kalsium oleh tanaman lain.

7. Pemantauan dan analisis kandungan tanah

Pengujian Tanah Secara Berkala: Melakukan analisis tanah secara berkala untuk memantau pH dan kandungan unsur hara, termasuk kalsium, sangat penting untuk mengidentifikasi kebutuhan pemupukan dan pengapuran yang tepat. Berdasarkan hasil analisis, petani dapat menyesuaikan praktik pertanian mereka untuk memastikan bahwa kadar kalsium tetap optimal untuk pertumbuhan tanaman.

10.5.4 Pengelolaan Kalsium pada Tanah Asam dan Alkalin

Pengelolaan kalsium dalam tanah asam dan alkalin merupakan aspek penting dalam pertanian, karena kalsium berperan vital dalam kesehatan tanaman dan kualitas tanah. Kalsium tidak hanya berfungsi sebagai nutrisi esensial bagi tanaman, tetapi juga mempengaruhi pH tanah dan ketersediaan unsur hara lainnya.

a. Tanah Asam

Tanah asam memiliki pH di bawah 6, yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan ketersediaan nutrisi. Kalsium dalam tanah asam sering kali rendah, sehingga perlu dilakukan pengelolaan untuk meningkatkan kadar kalsium dan pH tanah. Strategi pengelolaan tanah asam diantaranya:

- **Penambahan Kapur:** Kapur (CaCO_3) atau dolomit (yang mengandung kalsium dan magnesium) dapat digunakan untuk menaikkan

pH tanah. Aplikasi kapur membantu menetralkan keasaman dan meningkatkan ketersediaan kalsium. Efek lain dari strategi ini adalah mengurangi kelarutan aluminium dan mangan yang beracun bagi tanaman di tanah asam.

- Pupuk Kalsium: Pupuk yang mengandung kalsium seperti gipsum (CaSO_4) dapat digunakan untuk meningkatkan kadar kalsium tanpa meningkatkan pH secara signifikan. Gipsum juga membantu memperbaiki struktur tanah.
- Analisis Tanah: Melakukan analisis tanah secara berkala untuk menentukan kebutuhan kalsium dan pH yang tepat sangat penting untuk pengelolaan yang efektif.
- Penggunaan bahan organik: Penambahan kompos atau pupuk kandang membantu meningkatkan kandungan Ca melalui pelepasan kation-kation dari bahan organik. Bahan organik juga meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), sehingga kalsium lebih tersedia bagi tanaman.

b. Tanah Alkalin

Tanah alkalin memiliki pH tinggi (antara 8,5 hingga 10) dan sering kali mengandung karbonat serta bikarbonat bebas. Kondisi ini dapat membatasi kelarutan fosfor dan mikronutrien, serta mengurangi efisiensi pemupukan. Tanah ini memiliki struktur tanah yang buruk dan kapasitas infiltrasi yang terbatas dapat menghambat pertumbuhan akar tanaman. Strategi pengelolaan tanah alkalin adalah sebagai berikut:

- Penambahan Bahan Organik: Menambahkan bahan organik seperti kompos dapat membantu

menurunkan pH tanah melalui reaksi asam selama dekomposisi

- Aplikasi Gypsum: Gypsum dapat digunakan untuk meningkatkan ketersediaan kalsium tanpa mempengaruhi pH tanah secara signifikan. Ini juga membantu dalam memperbaiki struktur tanah. Penggunaan gipsum untuk mengurangi kadar natrium melalui pencucian ion Na^+ keluar dari profil tanah, tanpa meningkatkan pH lebih jauh.
- Asam Sulfat: Dalam kasus tanah yang sangat alkalin, aplikasi asam sulfat dapat efektif untuk menurunkan pH
- Peningkatan Drainase: Meningkatkan sistem drainase dapat membantu mengurangi akumulasi garam yang sering terjadi pada tanah alkalin, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman
- Penambahan Asam atau Amonium: Penambahan bahan asam seperti sulfur elemental (S) atau ammonium sulfat $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ membantu menurunkan pH tanah dan meningkatkan kelarutan Ca.
- Tanaman Toleran Alkalin: Tanaman seperti gandum, sorgum, atau kapas lebih toleran terhadap tanah alkalin dan dapat mengelola ketidakseimbangan Ca di tanah tersebut.

Pengelolaan kalsium pada tanah asam dan alkalin memerlukan pendekatan yang berbeda berdasarkan karakteristik masing-masing jenis tanah. Untuk tanah asam, penambahan kapur dan pupuk kalsium sangat dianjurkan untuk meningkatkan pH dan kadar kalsium. Sementara itu, pada tanah alkalin, strategi seperti penambahan bahan organik, aplikasi gipsum, serta pengendalian pH dengan asam sulfat menjadi penting untuk memastikan ketersediaan nutrisi yang optimal bagi

tanaman. Melalui pengelolaan yang tepat, produktivitas lahan pertanian dapat ditingkatkan meskipun menghadapi tantangan dari kondisi tanah yang ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Baunsele, A. B., Sabina Milik, V. A., Tukan, M. A. M., Missa, H., Kefi, Y., Oliveira, F. P., Loak, D. S., Lopo, A. N., Vebryani, N. K. M., Siki, S., & Baunsele, A. B. (2023). Sosialisasi dan Pemberian Puding Daun Kelor di Posyandu Bonen, Desa Baumata, Kabupaten Kupang, NTT. *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat Indonesia*, 2(2), 13–19. <https://doi.org/10.55542/jppmi.v2i2.515>
- Cotton, F. A., Wilkinson, G., Murillo, C. A., & Bochmann, M. (1999). *Advanced inorganic chemistry* (6th ed.). Wiley-Interscience
- Furniss, B. S., Hannaford, A. J., Smith, P. W. G., & Tatchell, A. R. (1989). *Vogel's textbook of practical organic chemistry* (5th ed.). Longman Scientific & Technical
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann
- Kadang, L., & Ola, P. D. (2021). Kajian Beberapa Parameter Fisik-Kimia Kualitas Sumber Air Bersih pada Lokasi Permukiman di Wilayah Pesisir Teluk Kupang. *Jurnal Biotropikal Sains*. 18(3).
- Kim, J., Jain, A., Zuo, K., Verduzco, R., Walker, S., Elimelech, M., Zhang, Z., Zhang, X., & Li, Q. (2019). Removal of calcium ions from water by selective electrosorption using target-ion specific nanocomposite electrode. *Water Research*, 160, 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.016>
- Rosenberg, S. S., & Spitzer, N. C. (2011). Calcium Signaling in Neuronal Development. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 3(10), a004259–a004259. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a004259>

- Setyorini, A., Suandi, I., Sidiartha, I. G. L., & Suryawan, W. B. (2016). Pencegahan Osteoporosis dengan Suplementasi Kalsium dan Vitamin D pada Penggunaan Kortikosteroid Jangka Panjang. *Sari Pediatri*, 11(1), 32. <https://doi.org/10.14238/sp11.1.2009.32-8>
- Singh, S., Dodt, J., Volkers, P., Hethershaw, E., Philippou, H., Ivaskevicius, V., Imhof, D., Oldenburg, J., & Biswas, A. (2019). Structure functional insights into calcium binding during the activation of coagulation factor XIII A. *Scientific Reports*, 9(1), 11324. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47815-z>
- Siswanto, B. (2019). Sebaran Unsur Hara N, P, K dan pH Dalam Tanah. *BUANA SAINS*, 18(2), 109. <https://doi.org/10.33366/bs.v18i2.1184>
- Sugiyarto. (2013). Kimia Anorganik Logam. *UNY Press*: Yogyakarta
- Syamsidar. (2013). Dasar Reaksi Kimia Anorganik. UIN Alauddin Makassar: Makassar.
- Vogel, A. I. (1979). *Vogel's qualitative inorganic analysis* (5th ed.). Longman Group Limited

BAB 11

UNSUR NITROGEN DALAM TANAH

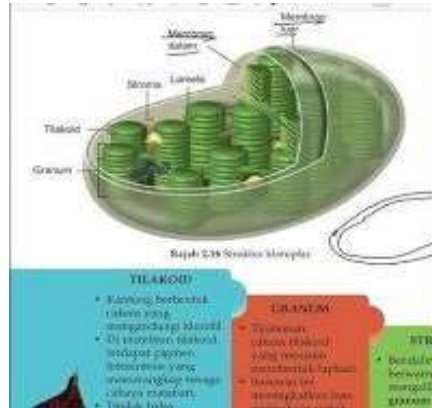
Oleh Mulyadi

11.1 Pentingnya Nitrogen Bagi Tumbuhan

Nitrogen (N) merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang sangat penting bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Unsur ini berperan dalam berbagai proses fisiologis tanaman, mulai dari pembentukan klorofil hingga sintesis protein. N merupakan bagian dari semua sel hidup. Di dalam tanaman N berfungsi sebagai komponen utama protein, hormon, klorofil, vitamin, dan enzim-enzim. N menyusun 40-50 % bobot kering protoplasma (Brady, N. C., & Weil, R. R. 2008).

11.1.1 Peran Nitrogen dalam Pertumbuhan Tanaman

1. **Pembentukan Klorofil:** Nitrogen merupakan komponen utama dalam pembentukan klorofil, pigmen hijau yang berperan penting dalam proses fotosintesis. Klorofil menangkap energi cahaya matahari yang kemudian digunakan untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi glukosa sebagai sumber energi bagi tanaman.



Gambar 11. 1 Struktur Klorofil

2. **Sintesis Protein:** Protein merupakan komponen struktural utama sel tanaman dan berperan dalam berbagai fungsi enzimatik. Nitrogen merupakan komponen dasar dari asam amino, yang merupakan unit penyusun protein. Oleh karena itu, ketersediaan nitrogen yang cukup sangat penting untuk sintesis protein dalam tanaman.
3. **Pertumbuhan Vegetatif:** Nitrogen merangsang pertumbuhan vegetatif tanaman, seperti percabangan, pembentukan daun, dan pertumbuhan batang. Kekurangan nitrogen akan menyebabkan pertumbuhan tanaman terhambat, daun menguning (klorosis), dan pertumbuhan menjadi kerdil.



Gambar 11. 2 Tanaman Jagung yang Kekurangan Nitrogen (Kiri) dan Cukup Nitrogen (Kanan)

4. Pembentukan Buah dan Biji: Nitrogen juga berperan dalam pembentukan buah dan biji. Kekurangan nitrogen dapat menyebabkan ukuran buah dan biji menjadi kecil serta mengurangi kualitas hasil panen.

11.1.2 Siklus Nitrogen

Siklus nitrogen adalah proses biogeokimia yang menggambarkan pergerakan nitrogen melalui atmosfer, tanah, dan organisme hidup. Proses utama dalam siklus nitrogen meliputi:

- Fiksasi nitrogen: Proses konversi nitrogen gas (N_2) menjadi amonia (NH_3) oleh bakteri pengikat nitrogen seperti *Rhizobium*.
- Amonifikasi: Proses penguraian bahan organik yang mengandung nitrogen oleh mikroorganisme menjadi amonia.
- Nitrifikasi: Proses oksidasi amonia menjadi nitrit (NO_2^-) dan kemudian menjadi nitrat (NO_3^-) oleh bakteri nitrifikasi.
- Denitrifikasi: Proses konversi nitrat menjadi gas nitrogen (N_2) oleh bakteri denitrifikasi (Salisbury, F. B., & Ross, C. W. 1992)

11.1.3 Defisiensi Nitrogen

Defisiensi nitrogen dapat menyebabkan berbagai gejala pada tanaman, antara lain:

- Klorosis: Daun menjadi kuning pucat karena kekurangan klorofil.
- Pertumbuhan terhambat: Tanaman tumbuh kerdil dan kurus.
- Daun tua menguning lebih dulu: Daun tua lebih dulu menunjukkan gejala defisiensi nitrogen karena nitrogen yang ada akan dipindahkan ke daun muda.

- Hasil panen menurun: Defisiensi nitrogen dapat mengurangi hasil panen secara signifikan (Marschner, H. 2012).

11.2 Sumber Nitrogen di Tanah, Proses Fiksasi, dan Dampaknya

11.2.1 Sumber Nitrogen di Tanah

Menurut Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008) Nitrogen adalah unsur hara esensial bagi pertumbuhan tanaman. Meskipun nitrogen melimpah di atmosfer dalam bentuk gas (N_2), tanaman tidak dapat langsung menyerapnya. Nitrogen yang tersedia bagi tanaman umumnya berasal dari beberapa sumber berikut:

- Bahan organik: Sisa tanaman dan hewan yang membusuk mengandung senyawa nitrogen organik. Melalui proses mineralisasi oleh mikroorganisme, senyawa organik ini diubah menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap tanaman, seperti amonia (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-).
- Fiksasi nitrogen: Proses konversi nitrogen gas (N_2) menjadi amonia (NH_3) oleh bakteri pengikat nitrogen. Bakteri ini dapat hidup bebas di tanah atau bersimbiosis dengan akar legum.
- Pupuk nitrogen: Pupuk sintetis atau organik yang mengandung nitrogen ditambahkan ke tanah untuk memenuhi kebutuhan tanaman.

11.2.2 Proses Fiksasi Nitrogen

Fiksasi nitrogen adalah proses biologis yang sangat penting dalam siklus nitrogen. Bakteri pengikat nitrogen memiliki enzim nitrogenase yang mampu memutus ikatan rangkap tiga nitrogen gas dan menggabungkannya dengan hidrogen membentuk amonia.

- Fiksasi nitrogen biologis: Dilakukan oleh bakteri seperti *Rhizobium* yang bersimbiosis dengan akar legum (kacang-kacangan), *Azotobacter* yang hidup bebas di tanah, dan *Cyanobacteria* yang hidup di air.
- Fiksasi nitrogen industri: Proses Haber-Bosch mengubah nitrogen dan hidrogen menjadi amonia untuk produksi pupuk.

11.2.3 Berbagai Jenis Pupuk Nitrogen

Pupuk nitrogen yang umum digunakan antara lain:

- Urea: Pupuk nitrogen sintetis dengan kandungan nitrogen tinggi. Mudah larut dalam air dan cepat diserap tanaman.
- Amonium sulfat: Pupuk nitrogen yang juga mengandung belerang. Lebih lambat lepas dibandingkan urea.
- Amonium nitrat: Campuran amonium dan nitrat. Mudah larut dan cepat diserap.
- Pupuk organik: Pupuk kandang, kompos, dan pupuk hijau mengandung nitrogen dalam bentuk organik yang lambat dilepas.

Tabel 11. 1 Kelebihan dan Kekurangan Pupuk Nitrogen

Jenis Pupuk	Kelebihan	Kekurangan	Dampak Lingkungan
Urea	Murah, mudah larut, kandungan N tinggi	Mudah menguap, dapat menyebabkan pencemaran air	Eutrofikasi, peningkatan emisi gas rumah kaca
Amonium sulfat	Mengandung belerang, lebih lambat lepas	Dapat menurunkan pH tanah	Asam sulfat dapat merusak tanah
Amonium nitrat	Mudah larut, cepat diserap	Mudah meledak, dapat	Eutrofikasi

Jenis Pupuk	Kelebihan	Kekurangan	Dampak Lingkungan
		mencemari air	
Pupuk organik	Meningkatkan kualitas tanah, pelepasan N lambat	Kandungan N lebih rendah, produksi lebih lama	Lebih ramah lingkungan

(Brady, N. C., & Weil, R. R. 2008)

11.2.4 Peran Legum dan Bakteri Pengikat Nitrogen

Legum dan bakteri pengikat nitrogen memiliki peran penting dalam meningkatkan kandungan nitrogen tanah:

- Fiksasi nitrogen secara alami: Legum menyediakan tempat tinggal bagi bakteri pengikat nitrogen dalam nodul akar. Bakteri mengubah nitrogen atmosfer menjadi amonia yang dapat digunakan oleh legum dan tanaman lain.
- Meningkatkan kesuburan tanah: Akar legum membantu memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kandungan bahan organik.

11.2.5 Mineralisasi Bahan Organik

Proses mineralisasi adalah penguraian bahan organik kompleks menjadi senyawa anorganik sederhana yang dapat diserap tanaman. Mikroorganisme seperti bakteri dan jamur berperan penting dalam proses ini. Faktor yang mempengaruhi laju mineralisasi antara lain suhu, kelembaban, aerasi, dan kandungan bahan organik.

11.2.6 Dampak Terhadap Lingkungan

Penggunaan pupuk nitrogen secara berlebihan dapat menyebabkan masalah lingkungan seperti:

- Eutrofikasi: Pencemaran perairan oleh nitrogen dan fosfor yang menyebabkan pertumbuhan alga yang berlebihan.
- Pencemaran air tanah: Nitrat dari pupuk dapat mencemari air tanah dan menyebabkan masalah kesehatan.
- Peningkatan emisi gas rumah kaca: Beberapa proses dalam siklus nitrogen menghasilkan gas nitrous oxide (N_2O) yang merupakan gas rumah kaca. (Salisbury, F. B., & Ross, C. W. 1992).

11.3 Proses Transformasi Nitrogen dalam Tanah

Nitrogen, sebagai salah satu unsur hara esensial bagi tanaman, mengalami berbagai transformasi dalam tanah. Transformasi ini melibatkan sejumlah proses biologi dan kimia yang saling terkait, membentuk siklus nitrogen. Proses-proses utama dalam transformasi nitrogen di tanah adalah mineralisasi, nitrifikasi, imobilisasi, denitrifikasi, dan leaching.

11.3.1 Mineralisasi

Mineralisasi adalah proses penguraian bahan organik yang mengandung nitrogen, seperti sisa tanaman dan hewan, menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap tanaman. Mikroorganisme seperti bakteri dan jamur berperan penting dalam proses ini. Enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme memecah senyawa organik kompleks menjadi amonia (NH_3). Amonia kemudian dapat diserap langsung oleh tanaman atau diubah menjadi amonium (NH_4^+) melalui proses protonasi.

11.3.2 Nitrifikasi

Nitrifikasi adalah proses oksidasi biologis amonia (NH_4^+) menjadi nitrit (NO_2^-) dan kemudian menjadi nitrat (NO_3^-). Proses ini dilakukan oleh bakteri autotrof kemolitotrof seperti *Nitrosomonas* yang mengoksidasi amonia menjadi nitrit, dan *Nitrobacter* yang mengoksidasi nitrit menjadi nitrat. Nitrat merupakan bentuk nitrogen yang paling mudah diserap oleh tanaman.

11.3.3 Imobilisasi

Imobilisasi adalah proses sebaliknya dari mineralisasi. Pada proses ini, nitrogen anorganik (amonia atau nitrat) diserap oleh mikroorganisme dan diubah menjadi senyawa organik dalam sel mikroorganisme. Nitrogen yang terimobilisasi tidak tersedia bagi tanaman hingga mikroorganisme mati dan mengalami dekomposisi.

11.3.4 Denitrifikasi

Denitrifikasi adalah proses reduksi nitrat (NO_3^-) menjadi gas nitrogen (N_2O atau N_2) yang kembali ke atmosfer. Proses ini dilakukan oleh bakteri heterotrof anaerob dalam kondisi tanah yang kekurangan oksigen. Denitrifikasi merupakan salah satu mekanisme utama kehilangan nitrogen dari ekosistem.

11.3.5 Leaching

Leaching adalah proses pencucian ion nitrat yang mudah larut ke dalam air tanah. Nitrat yang tercuci dapat mencemari sumber air dan menyebabkan eutrofikasi. *Leaching* sering terjadi pada tanah berpasir atau tanah dengan drainase yang buruk, terutama pada kondisi curah hujan tinggi.

11.3.6 Faktor yang Mempengaruhi Transformasi Nitrogen

- Jenis tanah: Tekstur, struktur, dan kandungan bahan organik tanah mempengaruhi laju transformasi nitrogen.
- Iklim: Suhu, curah hujan, dan aerasi tanah mempengaruhi aktivitas mikroorganisme.
- Jenis tanaman: Jenis tanaman dan sistem pertanian mempengaruhi jumlah dan jenis bahan organik yang masuk ke dalam tanah.
- Penggunaan pupuk: Pemberian pupuk nitrogen dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen bagi tanaman, tetapi juga dapat meningkatkan risiko leaching dan denitrifikasi.

11.3.7 Pentingnya Memahami Transformasi Nitrogen

Memahami proses transformasi nitrogen sangat penting dalam pengelolaan tanah dan nutrisi tanaman. Dengan memahami proses-proses ini, kita dapat:

- Meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk nitrogen: Meminimalkan kehilangan nitrogen melalui leaching dan denitrifikasi.
- Mencegah pencemaran lingkungan: Mengurangi risiko eutrofikasi dan pencemaran air tanah oleh nitrat.
- Meningkatkan produktivitas tanaman: Memastikan ketersediaan nitrogen yang cukup bagi tanaman.

11.4 Faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan Nitrogen dalam Tanah

Ketersediaan nitrogen dalam tanah merupakan faktor krusial yang mempengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi ketersediaan nitrogen adalah jenis tanah, iklim, dan pengolahan tanah.

11.4.1 Jenis Tanah

Jenis tanah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketersediaan nitrogen. Karakteristik fisik, kimia, dan biologi tanah saling berinteraksi dan mempengaruhi proses transformasi nitrogen.

- **Tekstur tanah:** Tanah bertekstur halus (lempung) cenderung memiliki kapasitas menahan air dan nutrisi yang lebih tinggi dibandingkan tanah bertekstur kasar (pasir). Namun, tanah lempung juga dapat mengalami kondisi anaerob yang menghambat proses nitrifikasi.
- **Struktur tanah:** Struktur tanah yang baik dengan banyak pori-pori memungkinkan aerasi yang baik, sehingga mendukung aktivitas mikroorganisme yang terlibat dalam proses mineralisasi dan nitrifikasi.
- **Kandungan bahan organik:** Tanah dengan kandungan bahan organik tinggi memiliki kapasitas penyangga yang lebih baik dan menyediakan sumber nitrogen organik yang lambat laun akan termineralisasi.
- **pH tanah:** pH tanah mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dan ketersediaan unsur hara. pH yang terlalu asam atau basa dapat menghambat aktivitas mikroorganisme yang terlibat dalam siklus nitrogen.

11.4.2 Iklim

Iklim memiliki pengaruh langsung terhadap proses transformasi nitrogen melalui suhu, curah hujan, dan kelembaban.

- **Suhu:** Suhu yang optimal akan meningkatkan aktivitas mikroorganisme, sehingga mempercepat proses mineralisasi dan nitrifikasi. Suhu yang terlalu

rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat aktivitas mikroorganisme.

- Curah hujan: Curah hujan yang tinggi dapat menyebabkan leaching nitrogen, terutama dalam bentuk nitrat yang mudah larut. Curah hujan juga dapat mempengaruhi aerasi tanah, yang berdampak pada aktivitas mikroorganisme.
- Kelembaban: Kelembaban tanah yang optimal diperlukan untuk aktivitas mikroorganisme. Kelembaban yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme.

11.4.3 Pengolahan Tanah

Pengolahan tanah memiliki dampak yang kompleks terhadap ketersediaan nitrogen.

- Pembajakan: Pembajakan dapat meningkatkan aerasi tanah dan mempercepat mineralisasi bahan organik. Namun, pembajakan yang berlebihan dapat menyebabkan kehilangan nitrogen melalui erosi dan volatilisasi amonia.
- Rotasi tanaman: Rotasi tanaman dengan legum dapat meningkatkan fiksasi nitrogen biologis dan meningkatkan kandungan nitrogen dalam tanah.
- Pemberian pupuk: Pemberian pupuk nitrogen dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen bagi tanaman, tetapi jika tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran lingkungan.
- Mulsa: Penggunaan mulsa dapat mengurangi kehilangan nitrogen akibat erosi dan penguapan, serta meningkatkan kandungan bahan organik tanah.

11.4.5 Interaksi Antar Faktor

Faktor-faktor di atas saling berinteraksi dan mempengaruhi ketersediaan nitrogen dalam tanah. Sebagai contoh, pada tanah berpasir dengan drainase yang buruk, leaching nitrogen akan lebih tinggi dibandingkan pada tanah lempung dengan drainase yang baik. Demikian pula, pada iklim kering, kehilangan nitrogen melalui penguapan akan lebih tinggi dibandingkan pada iklim lembab.

11.4.6 Pentingnya Mengelola Ketersediaan Nitrogen

Memahami faktor-faktor yang mempengaruhi ketersediaan nitrogen sangat penting untuk mengelola kesuburan tanah dan meningkatkan produktivitas tanaman. Beberapa strategi pengelolaan yang dapat dilakukan antara lain:

- Analisis tanah: Melakukan analisis tanah secara berkala untuk mengetahui status nitrogen dalam tanah.
- Pemilihan varietas tanaman: Memilih varietas tanaman yang efisien dalam pemanfaatan nitrogen.
- Rotasi tanaman: Melakukan rotasi tanaman dengan legum untuk meningkatkan fiksasi nitrogen biologis.
- Pemberian pupuk: Memberikan pupuk nitrogen sesuai dengan kebutuhan tanaman dan kondisi tanah.
- Pengelolaan air irigasi: Mengatur jadwal dan jumlah irigasi untuk mencegah leaching nitrogen.
- Penggunaan mulsa: Menggunakan mulsa untuk mengurangi kehilangan nitrogen akibat erosi dan penguapan.

11.5 Pengelolaan Nitrogen yang Berkelanjutan

Pengelolaan nitrogen yang berkelanjutan merupakan upaya untuk mengoptimalkan penggunaan nitrogen dalam pertanian sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Hal ini sangat penting mengingat peran krusial nitrogen bagi pertumbuhan tanaman dan dampak lingkungan dari penggunaan nitrogen yang berlebihan, seperti eutrofikasi dan emisi gas rumah kaca.

11.5.1 Strategi Pengelolaan Nitrogen Berkelanjutan

1. Analisis Tanah dan Tanaman:
 - Pengujian Tanah: Melakukan analisis tanah secara berkala untuk mengetahui kandungan nitrogen yang tersedia, pH, dan kandungan bahan organik.
 - Analisis Tanaman: Melakukan analisis tanaman untuk mengetahui kebutuhan nitrogen tanaman dan gejala defisiensi atau kelebihan nitrogen.
2. Pemilihan Varietas Tanaman:
 - Efisiensi Nitrogen: Memilih varietas tanaman yang efisien dalam pemanfaatan nitrogen, memiliki pertumbuhan yang cepat, dan toleran terhadap kekurangan nitrogen.
 - Fiksasi Nitrogen: Mengutamakan tanaman legum yang dapat bersimbiosis dengan bakteri *Rhizobium* untuk memfiksasi nitrogen dari udara.
3. Rotasi Tanaman:
 - Meningkatkan Kesuburan Tanah: Melakukan rotasi tanaman dengan legum untuk meningkatkan kandungan nitrogen dalam tanah secara alami.

- Mengurangi Hama dan Penyakit: Rotasi tanaman dapat membantu mengendalikan hama dan penyakit tanaman.
- 4. Pengelolaan Pupuk:
 - Pupuk Sesuai Kebutuhan: Memberikan pupuk nitrogen sesuai dengan hasil analisis tanah dan kebutuhan tanaman.
 - Pupuk Slow Release: Menggunakan pupuk nitrogen lepas lambat untuk meminimalkan kehilangan nitrogen akibat leaching dan volatilisasi.
 - Pupuk Organik: Meningkatkan penggunaan pupuk organik seperti kompos dan pupuk hijau untuk memperbaiki struktur tanah dan menyediakan sumber nitrogen yang berkelanjutan.
- 5. Irigasi Presisi:
 - Efisiensi Air dan Pupuk: Mengatur jadwal dan jumlah irigasi secara presisi untuk menghindari leaching nitrogen.
 - Sistem Irigasi Tetes: Menggunakan sistem irigasi tetes untuk memberikan pupuk nitrogen secara langsung ke zona perakaran tanaman.
- 6. Pengelolaan Limbah Pertanian:
 - Komposting: Mengolah limbah pertanian menjadi kompos untuk meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan menyediakan sumber nitrogen.
 - Biogas: Mengolah limbah organik menjadi biogas untuk menghasilkan energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca.
- 7. Tahanan Erosi:
 - Tanaman Penutup: Menanam tanaman penutup untuk melindungi tanah dari erosi dan meningkatkan kandungan bahan organik.

- Terasering: Membuat terasering pada lahan miring untuk mengurangi erosi tanah.
- 8. Pemantauan dan Evaluasi:
 - Indikator Kinerja: Menetapkan indikator kinerja untuk mengukur keberhasilan pengelolaan nitrogen, seperti peningkatan hasil panen, penurunan penggunaan pupuk, dan penurunan kadar nitrat dalam air tanah.

11.5.2 Pemantauan Ketersediaan Nitrogen

Pemantauan ketersediaan nitrogen secara berkala sangat penting untuk mengevaluasi efektivitas strategi pengelolaan yang telah dilakukan. Beberapa metode pemantauan yang dapat dilakukan antara lain:

- Analisis Tanah: Melakukan analisis tanah secara berkala untuk memantau perubahan kandungan nitrogen, pH, dan kandungan bahan organik.
- Analisis Tanaman: Melakukan analisis tanaman untuk mengetahui status nutrisi tanaman dan gejala defisiensi atau kelebihan nitrogen.
- Pengukuran Emisi Gas Rumah Kaca: Mengukur emisi gas rumah kaca, terutama nitrous oxide (N_2O), untuk menilai dampak pengelolaan nitrogen terhadap perubahan iklim.
- Pemantauan Kualitas Air: Memantau kualitas air tanah dan permukaan untuk mengetahui kadar nitrat dan amonia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali Munawar. (2011). *Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman*. IPB Press. Bogor.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *Elements of the nature and properties of soils*. Pearson Prentice Hall.
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2011). *Biology: A global approach*. Pearson Education.
- Erni Martani. 2005. *Populasi rhizobium dan fiksasi nitrogen pada kedelai di tanah gambut yang diperlakukan dengan paraquat*. Jurnal Tanah Tropika.
- John L. Havlin, Samuel L. Tisdale, Werner L. Nelson, James D. Beaton. (2013). *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson Education.
- Marschner, H. (2012). *Mineral nutrition of higher plants*. Academic press.
- Nurhidayati. 2017. *Kesuburan dan Kesehatan Tanah*. Intimedia, Malang
- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1992). *Plant physiology*. Wadsworth Publishing Company.
- Sarief, 1986. *Kesuburan dan Pemupukan Tanah Pertanian*. Pustaka Buana, Bandung.
- Setyamidjaja, Djohana. 1986. *Pupuk dan Pemupukan*. Aneka Ilmu. Semarang.
- Sri Setyati Harjadi. 2018. *Dasar-Dasar Agronomi*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2015). *Plant physiology and development*. Sinauer Associates.
- Yuwono, T. (2006). *Teori dan Aplikasi Polymerase Chain, Panduan Eksperimen PCR untuk Memecahkan Masalah Biologi Terkini*. Yogyakarta.

BAB 12

UNSUR BELERANG DALAM TANAH

Oleh Abdi Suprayitno

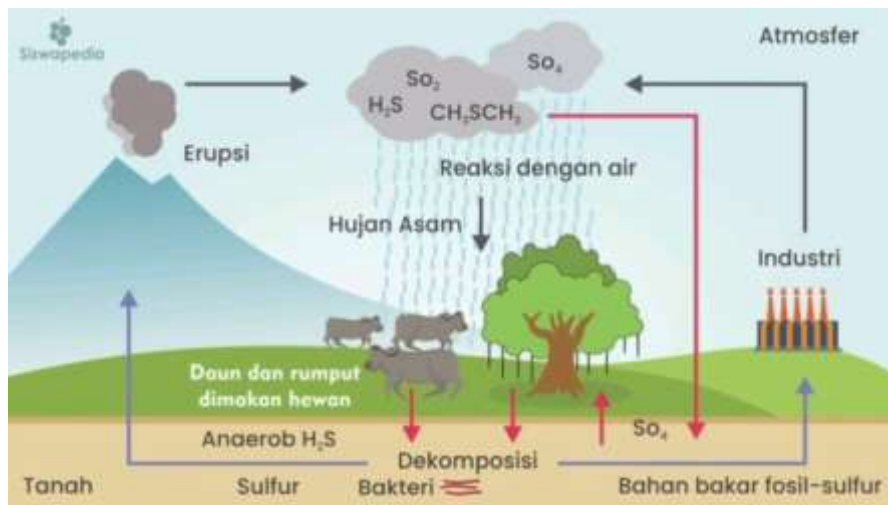
12.1 Pendahuluan

Tanah merupakan salah satu komponen penting dalam ekosistem, yang terdiri dari berbagai elemen mineral dan bahan organik. Salah satu elemen mineral yang memiliki peranan penting dalam tanah adalah belerang atau sulfur (Maulida dan Purwanti, 2023). Sulfur ditemukan dalam berbagai bentuk di dalam tanah, seperti senyawa sulfat (SO_4^{2-}), sulfida (S^{2-}), dan belerang elementar (S^0).

Keberadaan sulfur di dalam tanah memiliki hubungan yang erat dengan kualitas airtanah. Pencemaran udara, baik dari kegiatan industri maupun pembakaran bahan bakar fosil, dapat menyebabkan peningkatan kandungan sulfur di dalam tanah. Sulfur yang terkandung dalam tanah dapat larut dan terbawa ke dalam airtanah, sehingga dapat mempengaruhi kualitas air tanah. Penelitian yang dilakukan di Padukuhan Seturan, Desa Caturtunggal, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, menunjukkan bahwa aktivitas manusia seperti pembangunan tempat tinggal, perkantoran, dan usaha lain dapat berdampak pada peningkatan kadar sulfur di dalam airtanah (Hakim, Sungkowo, dan Santoso 2023). Hal ini disebabkan karena kegiatan tersebut dapat melepaskan sulfur ke dalam tanah, yang kemudian terbawa ke dalam air tanah.

Selain itu, penelitian lain mengenai pencemaran udara oleh gas hidrogen sulfida (H_2S) di TPA Ganet, Kota Tanjungpinang, juga menunjukkan dampak negatif terhadap

kesehatan manusia. Paparan konsentrasi rendah hidrogen sulfida dapat menyebabkan iritasi pada mata, hidung, atau tenggorokan (Simbolon, Nurmaini dan Hasan, 2019). Dari berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa keberadaan sulfur dalam tanah memiliki kaitan erat dengan kualitas air tanah yang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan manusia.



Gambar 12. 1 Siklus Sulfur di Alam (Rahayu, 2024)

Gambar 12.1 menunjukkan bahwa kandungan sulfur yang ada didalam tanah berasal dari batuan hasil proses geologi, aktivitas organisme dan aktivitas makhluk hidup yang ada di atas permukaan. Peranan bakteri di bawah tanah sangat penting dalam meningkatkan kandungan sulfur sebagai materi sisa metabolisme. Iklim diatas permukaan juga berdampak signifikan dalam hal membantu senyawa yang mengandung sulfur untuk masuk kedalam tanah.

Untuk menghindari dampak negatif dari sulfur dalam tanah terhadap air tanah, diperlukan upaya-upaya pengelolaan yang komprehensif. Pemerintah dan masyarakat harus bekerja sama dalam menjaga kualitas tanah dan air tanah, misalnya dengan mengurangi aktivitas yang dapat

melepaskan sulfur ke dalam tanah, serta melakukan pemantauan kualitas air tanah secara berkala (Julaikah and Astuti, 2023).

12.2 Distribusi Belerang di dalam Tanah

Menurut Alvian, Ekyastuti, dan Arbiastutie (2023) belerang merupakan salah satu elemen penting dalam ekosistem tanah, yang dapat berasal dari berbagai sumber, baik sumber alami maupun sumber antropogenik. Sumber alami belerang dalam tanah terutama berasal dari aktivitas vulkanik dan pelapukan batuan, sedangkan sumber antropogenik dapat berasal dari penggunaan pupuk dan limbah industry. Distribusi belerang di berbagai jenis tanah sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti iklim, topografi, dan aktivitas manusia.



Gambar 12. 2 Belerang atau Sulfur di Alam (Rumuskimia.net, 2015)

Aktivitas vulkanik, yang ditandai dengan letusan gunung berapi, merupakan salah satu sumber alami belerang dalam tanah. Gas-gas vulkanik yang dilepaskan ke atmosfer dapat mengandung senyawa belerang, seperti sulfur dioksida, yang kemudian jatuh ke permukaan tanah melalui hujan asam. Selain itu, pelapukan batuan yang mengandung senyawa belerang, seperti pirit, juga dapat melepaskan belerang ke tanah (Raimunah, dkk., 2018)

Di sisi lain, sumber antropogenik belerang dalam tanah dapat berasal dari penggunaan pupuk yang mengandung belerang, seperti pupuk ammonium sulfat, serta limbah industri yang mengandung senyawa belerang (Arif, Danoedoro, dan Hartono 2018). Aktivitas manusia lainnya, seperti pembakaran bahan bakar fosil, dapat berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi belerang dalam tanah melalui proses deposisi atmosferik, di mana partikel-partikel belerang yang terbawa dalam emisi udara akhirnya terdeposisi di permukaan tanah (Alvian, dkk., 2023).

Distribusi belerang dalam tanah dapat bervariasi tergantung pada jenis tanah. Tanah dengan pH yang berkisar 5-7, kelembaban sekitar 33%, serta jenis tanah ultisol atau aluvial dengan tekstur lempung, dapat menjadi habitat yang kondusif bagi pertumbuhan tanaman yang memerlukan belerang (Purbalisa, dkk., 2020).

Upaya untuk mengoptimalkan distribusi belerang dalam tanah, seperti penambahan bahan organik dalam bentuk kompos atau biochar, dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan belerang oleh tanaman serta memperbaiki kualitas tanah secara keseluruhan. Selain itu, konservasi kelestarian ekosistem alami, seperti hutan dan lahan gambut, juga dapat membantu menjaga keseimbangan siklus belerang di alam (Zhang *et al.*, 2023).

12.3 Sifat Kimia dan Biologi Belerang dalam Tanah

Sebagai komponen alami yang terkandung dalam tanah, belerang merupakan unsur penting yang berperan krusial dalam berbagai proses di dalam ekosistem tanah, seperti

siklus nutrisi, reaksi kimia, dan aktivitas biologis, yang menjadikan pemahaman tentang sifat kimia dan biologinya sangat esensial. Dari sudut pandang kimia, belerang dalam tanah dapat ditemukan dalam berbagai bentuk senyawa, seperti sulfat, sulfida, dan sulfit, yang masing-masing memiliki karakteristik dan peran yang berbeda. Sifat redoks belerang memungkinkannya berpartisipasi dalam reaksi oksidasi-reduksi, yang berimplikasi pada ketersediaan nutrisi dan dinamika racun dalam tanah. Selain itu, belerang juga terlibat dalam pembentukan asam-asam organik dan mineral yang memengaruhi pH tanah, serta interaksinya dengan logam-logam lain yang dapat mengubah mobilitas, ketersediaan, dan toksisitas elemen-elemen tersebut (Purbalisa *et al.*, 2020).

Sementara itu, dari sisi biologi, belerang merupakan nutrisi esensial bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman, serta berperan dalam aktivitas dan struktur komunitas mikroba di dalam tanah. Beberapa mikroba, seperti bakteri dan arkea, Concheri dkk. (2018) berpendapat mampu melakukan transformasi belerang antara bentuk organik dan anorganik, memainkan peran penting dalam siklus biogeokimia belerang di tanah. Kehadiran belerang juga dapat menstimulasi aktivitas mikroba yang terlibat dalam proses-proses penting lainnya, seperti dekomposisi bahan organik dan pembentukan humus, yang pada akhirnya dapat memengaruhi siklus nutrisi, kesuburan, serta karakteristik fisik, kimia, dan biologis tanah secara menyeluruh.

Pemahaman yang mendalam mengenai sifat kimia dan biologi belerang dalam tanah dapat memberikan wawasan berharga bagi pengelolaan tanah yang lebih efektif dan berkelanjutan, terutama dalam konteks praktik pertanian, rehabilitasi lahan, dan upaya menjaga kelestarian ekosistem tanah beserta segala proses alami yang terjadi di dalamnya untuk menjaga keseimbangan dan kesehatan lingkungan secara holistik (Nurjanah dan Samsir, 2021).

12.3.1 Bentuk-bentuk Belerang dalam Tanah

Belerang (S) merupakan salah satu dari enam unsur hara makro esensial bagi pertumbuhan tanaman, di mana perannya dalam proses fisiologis dan biokimia tanaman tidak dapat digantikan oleh unsur hara lain. Dalam tanah, belerang dapat ditemukan dalam bentuk organik maupun anorganik, dengan sulfat (SO_4^{2-}) sebagai bentuk anorganik yang paling tersedia bagi tanaman.

Belerang organik dalam tanah berasal dari dekomposisi bahan organik, terutama yang kaya akan senyawa belerang seperti protein, asam amino, dan senyawa volatil yang mengandung belerang. Proses perubahan belerang dari bentuk organik menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap tanaman, seperti sulfat, terjadi melalui aktivitas mikroorganisme dalam tanah. Sementara, sumber belerang anorganik dalam tanah berasal dari mineral-mineral yang mengandung belerang, seperti gips (kalsium sulfat) dan pirit (besi sulfida), yang dapat mengalami pelapukan secara fisik, kimia, maupun biologis sehingga menghasilkan senyawa sulfat (Yuniarti, Wahyuni dan Kusuma, 2023).

Ketersediaan sulfat bagi tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya kandungan bahan organik, aktivitas mikroorganisme, serta kondisi lingkungan seperti pH dan kelembaban tanah. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan bahan organik, seperti kompos, dapat meningkatkan ketersediaan belerang dalam tanah, baik dalam bentuk organik maupun anorganik (Sadono, Soeprijadi and Wirabuana, 2019). Selain itu, pemberian bahan organik dapat menjadi sumber energi dan nutrisi bagi komunitas mikroba tanah, yang kemudian dapat meningkatkan aktivitas mereka dalam mengoksidasi belerang organik menjadi sulfat, sehingga meningkatkan ketersediaan sulfat yang dapat diserap dan dimanfaatkan oleh tanaman untuk

mendukung pertumbuhan dan perkembangannya secara optimal.

12.3.2 Transformasi Belerang dalam Tanah

Proses mineralisasi belerang dalam tanah melibatkan perubahan bentuk senyawa belerang organik menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap oleh tanaman (Purbalisa dkk., 2020). Hal ini terjadi melalui aktivitas mikroorganisme tanah, seperti bakteri dan jamur, yang memecah senyawa belerang organik menjadi senyawa anorganik, seperti sulfat (SO_4^{2-}). Faktor-faktor lingkungan, seperti suhu, kelembaban, dan pH tanah, mempengaruhi laju proses mineralisasi ini (Putra, 2020). Di sisi lain, proses immobilisasi belerang mengacu pada transformasi senyawa anorganik belerang menjadi bentuk organik, seperti protein dan asam amino, yang terkandung dalam biomassa mikroorganisme tanah.

Selama proses mineralisasi dan immobilisasi, mikroorganisme tanah memainkan peran kunci dalam siklus belerang. Komunitas mikroba yang beragam, dengan kemampuan metabolisme yang spesifik, terlibat dalam transformasi belerang melalui reaksi biotik dan abiotik di dalam tanah. Sebagai contoh, bakteri oksidasi sulfur mengubah senyawa sulfur anorganik menjadi sulfat, sedangkan bakteri reduksi sulfat dapat mereduksi sulfat menjadi sulfida. Selain itu, mikroba tanah juga dapat menghasilkan enzim-enzim yang mendukung proses mineralisasi dan immobilisasi belerang (Turista, 2017).

Pemahaman yang mendalam mengenai dinamika transformasi belerang dan peran mikroorganisme di dalamnya sangat penting untuk mendukung upaya pengelolaan kesuburan tanah dan produktivitas pertanian yang berkelanjutan (Sadewa dkk., 2020).

12.4 Sifat Kimia dan Biologi Belerang dalam Tanah

Fungsi belerang dalam metabolisme tanaman sangat beragam, di antaranya adalah sebagai komponen pembentuk asam amino sistein dan metionin yang selanjutnya akan disintesis menjadi protein, serta berperan dalam proses pembentukan enzim dan vitamin (Rumidatul *et al.*, 2021).

Yuniarti dkk. (2023) menyatakan kekurangan belerang pada tanaman dapat menyebabkan gejala klorosis pada daun muda, pertumbuhan tanaman terhambat, dan penurunan produksi. Di sisi lain, kelebihan belerang juga dapat memengaruhi kesehatan tanaman seperti terhambatnya penyerapan unsur hara lain oleh akar tanaman. Belerang merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang dibutuhkan tanaman untuk beberapa proses metabolisme penting. Fungsi belerang dalam tanaman di antaranya adalah sebagai penyusun asam-asam amino sistein dan metionin yang selanjutnya akan disintesis menjadi protein. Peran belerang lainnya adalah dalam pembentukan berbagai enzim yang berperan dalam proses-proses fisiologis tanaman, seperti fotosintesis, respirasi, dan metabolisme karbohidrat, serta dalam sintesis beberapa vitamin penting bagi tanaman seperti vitamin B1 dan biotin. Kekurangan belerang pada tanaman akan menyebabkan gejala klorosis pada daun muda, pertumbuhan tanaman terhambat, serta penurunan produksi. Sebaliknya, jika terjadi kelebihan belerang, dapat memengaruhi kesehatan tanaman seperti terhambatnya penyerapan unsur hara lain oleh akar tanaman.

Oleh karena itu, pemberian unsur hara yang sesuai jumlah dan komposisi, termasuk belerang, dapat meningkatkan produktivitas tanaman. Kekurangan belerang pada tanaman dapat menyebabkan gejala klorosis pada daun muda, pertumbuhan tanaman terhambat, dan penurunan produksi (Putra, 2020). Di sisi lain, kelebihan belerang juga dapat memengaruhi kesehatan tanaman seperti terhambatnya

penyerapan unsur hara lain oleh akar tanaman (Hidayat dkk., 2020).

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan belerang pada media tanam dapat meningkatkan sintesis gula pada buah serta mencegah serangan jamur, sehingga produk yang dihasilkan lebih berkualitas (Witariadi dan Putri, 2018).

12.5 Peran Belerang Didalam Tanah

Menurut Alvian dkk. (2023) bahwa belerang berperan dalam berbagai proses metabolisme tumbuhan, seperti pembentukan klorofil, aktivitas enzim, dan sintesis protein. Bentuk belerang dalam tanah sangat beragam, mulai dari senyawa yang mudah larut dalam air hingga yang sukar larut, dan masing-masing bentuk memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan nutrisi serta memperkaya kesuburan tanah. Tanah dengan kandungan belerang yang memadai akan mampu mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik, meningkatkan hasil panen, serta mempertahankan struktur dan kesehatan tanah jangka panjang, sehingga sistem pertanian dapat terus berlanjut secara berkelanjutan, baik dari segi produktivitas maupun kelestarian lingkungan (Putra, 2020).

Berbagai penelitian telah menunjukkan manfaat belerang dalam tanah, khususnya pada tanah-tanah yang didominasi oleh jenis tanah Aluvial. Studi tentang permeabilitas tanah Aluvial di sepanjang DAS Cimanuk, Indramayu, membuktikan bahwa kandungan belerang dalam tanah berperan dalam mengatur pergerakan air, yang merupakan aspek penting dalam hubungannya dengan lingkungan (Mulyono, Rusydi, dan Lestiana, 2019). Selain itu, analisis penyebab terjadinya bencana tanah longsor di Desa Banaran, Kecamatan Pulung, Kabupaten Ponorogo, juga mengindikasikan bahwa keberadaan belerang dalam tanah berkontribusi terhadap

stabilitas lereng dan meminimalkan risiko longsor (Naryanto dkk., 2019). Peran belerang lainnya adalah meningkatkan aktivitas mikroba didalam tanah, peningkatan kualitas tanaman melalui perbaikan struktur dan pH tanah dan belerang juga berada pada siklus nutrisi tanah serta memperbaiki gejala defisiensi pada tanaman.

Hasil-hasil penelitian tersebut mempertegas pentingnya menjaga dan meningkatkan kandungan belerang dalam tanah, tidak hanya untuk menjaga keseimbangan ekologi, namun juga untuk memaksimalkan potensi lahan pertanian yang berkelanjutan (Hidayat dkk., 2020).

12.6 Dampak Lingkungan dari pengelolaan Belerang

Belerang (sulfur) merupakan salah satu senyawa kimia yang memainkan peran penting dalam berbagai industri dan aktivitas manusia, namun pengelolaannya yang tidak tepat dapat memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan. Industri yang melibatkan sumber daya alam, termasuk belerang, telah menyebabkan serangkaian masalah pencemaran lingkungan seiring dengan pertumbuhannya yang pesat. Berbagai aktivitas ekonomi terutama organisasi bisnis yang tidak terkontrol dan tidak berorientasikan pada kepentingan lingkungan hidup dipastikan berpeluang besar untuk merusak lingkungan hidup (Machfudt dan Fazli Syam, 2023).



Gambar 12. 3 Pencemaran Udara Berupa Sulfur Dioksida (ESA.int, 2020)

Perkembangan aktivitas industri, terutama sektor industri kecil dan menengah, selain memberikan sumbangan terhadap perkembangan ekonomi, juga memberikan dampak terhadap perubahan lingkungan. Keluaran Bukan Produk yang ditimbulkan dari proses produksi belerang antara lain: ceceran belerang, belerang pecah, belerang gosong, blothong sisa proses pencucian, air sisa proses pencucian, emisi udara, ceceran oli dari mesin diesel dan kebisingan (Nugroho, Purwanto, dan Suherman, 2016).

Selain itu, pengelolaan belerang yang tidak tepat juga dapat menyebabkan pencemaran air, udara, dan tanah. Permasalahan ini terjadi karena pihak-pihak terkait, terutama industri, belum memiliki kepedulian yang cukup terhadap dampak lingkungan dari penggunaan teknologi dan bahan-bahan berbahaya seperti belerang (Riksaning Ayu and Supartoko, 2020).

DAFTAR PUSTAKA

- Alvian, Ekyastuti, W. and Arbiastutie, Y. (2023) 'Studi Habitat Dan Pola Sebaran Tumbuhan Belimbing Darah (*Baccaurea angulata*) Di Kawasan Kebun Raya Samba', *Jurnal Hutan Lestari*, 11(1), p. 145. Available at: <https://doi.org/10.26418/jhl.v11i1.54085>.
- Arif, N., Danoedoro, P. and Hartono, H. (2018) 'Pemodelan Spasial Erosi Kualitatif Berbasis Raster Studi Kasus di DAS Serang, Kabupaten Kulonprogo', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 15(2), p. 127. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.15.2.127-134>.
- Concheri, G. *et al.* (2018) 'Fertimetro, a Principle and Device to Measure Soil Nutrient Availability for Plants by Microbial Degradation Rates on Differently-Spiked Buried Threads', *Soil Systems*, 3(1), p. 3. Available at: <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010003>.
- ESA.int (2020) *ESA - Sulphur dioxide concentrations drop over India during COVID-19*. Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Sulphur_dioxide_concentrations_drop_over_India_during_COVID-19 (Accessed: 29 January 2025).
- Hakim, P.I., Sungkowo, A. and Santoso, D.H. (2023) 'Kajian Pencemaran Airtanah Di Padukuhan Seturan, Desa Caturtunggal, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta', *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumian Satu Bumi*, 1(1). Available at: <https://doi.org/10.31315/psb.v1i1.9037>.

- Hidayat, Y. *et al.* (2020) 'Implementasi Teknologi Peningkatan Produktivitas Lahan Kering Di Bawah Tegakan Kelapa di Maluku Utara [Implementation Technology to Productivity Increase at Dryland under Coconut in North Maluku]', *Buletin Palma*, 21(1), p. 11. Available at: <https://doi.org/10.21082/bp.v21n1.2020.11-21>.
- Julaikah, J. and Astuti, B.W. (2023) 'Pengelolaan Air Bersih Siap Guna Dengan Metode Filtrasi Pada Pondok Pesantren X Daerah Bantul', *Jurnal Ilmiah Pengabdian Masyarakat Bidang Kesehatan (Abdigermas)*, 1(1), pp. 55–59. Available at: <https://doi.org/10.58723/abdigermas.v1i1.9>.
- Machfudt, Y. and Fazli Syam (2023) 'Kinerja Keuangan Dalam Perspektif Lingkungan: Studi Pada Perusahaan Manufaktur Indonesia', *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Ekonomi Akuntansi*, 8(2), pp. 158–168. Available at: <https://doi.org/10.24815/jimeka.v8i2.21063>.
- Maulida, S.A. and Purwanti, I.F. (2023) 'Kajian Pengolahan Air Asam Tambang Industri Pertambangan Batu Bara dengan Constructed Wetland', *Jurnal Teknik ITS*, 12(1). Available at: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v12i1.111230>.
- Mulyono, A., Rusydi, A.F. and Lestiana, H. (2019) 'Permeabilitas Tanah Berbagai Tipe Penggunaan Lahan Di Tanah Aluvial Pesisir DAS Cimanuk, Indramayu', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(1), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.17.1.1-6>.
- Naryanto, H.S. *et al.* (2019) 'Analisis Penyebab Kejadian dan Evaluasi Bencana Tanah Longsor di Desa Banaran, Kecamatan Pulung, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur Tanggal 1 April 2017', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), p. 272. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.17.2.272-282>.

- Nugroho, M.S.E., Purwanto, P. and Suherman, S. (2016) 'Pengelolaan Lingkungan pada IKM Garam Konsumsi Beryodium di Kabupaten Rembang', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 14(2), p. 88. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.14.2.88-95>.
- Nurjanah and Samsir (2021) 'CSR Program PT Pertamina Based On Community Empowerment In Peat Ecotourism Development', *Sosiohumaniora*, 23(2), p. 269. Available at: <https://doi.org/10.24198/sosiohumaniora.v23i2.32527>.
- Purbalisa, W. *et al.* (2020) 'Carbon and Microbial Dynamics in Soil on Biochar Compost Plus Treatment', *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 17(2), pp. 138-143. Available at: <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v17i2.138-143>.
- Putra, I.P. (2020a) 'Fungiculture : Sistem Pertanian Fungi oleh Serangga', *SIMBIOSA*, 9(1), p. 77. Available at: <https://doi.org/10.33373/sim-bio.v9i1.2468>.
- Putra, I.P. (2020b) 'Fungiculture : Sistem Pertanian Fungi oleh Serangga', *SIMBIOSA*, 9(1), p. 77. Available at: <https://doi.org/10.33373/sim-bio.v9i1.2468>.
- Rahayu, S. (2024) *Pengertian Daur Sulfur dan Manfaatnya Bagi Lingkungan*. Available at: <https://www.harapanrakyat.com/2024/08/pengertian-daur-sulfur-dan-manfaatnya-bagi-lingkungan/> (Accessed: 24 January 2025).
- Raimunah, R. *et al.* (2018) 'Angka kuman udara ruang rawat inap anak dengan dan tanpa air conditioner (AC) di rumah sakit', *Jurnal Skala Kesehatan*, 9(1). Available at: <https://doi.org/10.31964/jsk.v9i1.152>.

- Riksaning Ayu, K. and Supartoko, B. (2020) 'Strategi Perusahaan Sido Muncul dalam Pengembangan Kegiatan Corporate Social Responsibility', *Warta ISKI*, 3(01), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.25008/wartaiski.v3i01.47>.
- Rumidatul, A. *et al.* (2021) 'Uji Aktivitas Antimikroba Ekstrak Kulit Ranting dan Kayu Sakit Sengon (*Falcataria moluccana*) dengan Pelarut Metanol dan Etil Asetat', *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 8(1), p. 30. Available at: <https://doi.org/10.32807/jambs.v8i1.211>.
- Rumuskimia.net (2015) *Rumus Kimia Belerang - Rumus Kimia*. Available at: <https://www.rumuskimia.net/2015/12/rumus-kimia-belerang.html> (Accessed: 29 January 2025).
- Sadewa, B. *et al.* (2020) 'Pengaruh Aplikasi Asam Humat dan Pemupukan Fosfat terhadap Populasi dan Biomassa Cacing Tanah pada Pertanaman Jagung (*Zea mays* L.) di Tanah Ultisol', *Journal of Tropical Upland Resources (J. Trop. Upland Res.)*, 2(1), pp. 36–45. Available at: <https://doi.org/10.23960/jtur.vol2no1.2020.77>.
- Sadono, R., Soeprijadi, D. and Wirabuana, P.Y.A.P. (2019) 'Variasi Sifat Kimia Tanah Pada Sistem Agroforestri di Kawasan Hutan Tanaman Kayu Putih', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), p. 205. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.17.2.205-211>.
- Simbolon, V.A., Nurmaini, N. and Hasan, W. (2019) 'Pengaruh Paparan Gas Hidrogen Sulfida (H₂S) terhadap Keluhan Saluran Pernafasan pada Pemulung di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Ganet Kota Tanjungpinang Tahun 2018', *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 18(1), p. 42. Available at: <https://doi.org/10.14710/jkli.18.1.42-49>.

- Turista, D.D.R. (2017) 'Biodegradation of organic liquid waste by using consortium bacteria as material preparation of environmental pollution course textbook', *JPBI (Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia)*, 3(2), pp. 95–102. Available at: <https://doi.org/10.22219/jpbi.v3i2.4322>.
- Witariadi, N.M. and Putri, B.R.T. (2018) 'Teknologi Fermentasi Untuk Meningkatkan Kualitas Pupuk Organoplus', *Buletin Udayana Mengabdi*, 17(3). Available at: <https://doi.org/10.24843/bum.2018.v17.i03.p17>.
- Yuniarti, E., Wahyuni, E.T. and Kusuma, L. (2023) 'Analisis Konsep IPA pada Sistem Hidroponik DFT (Deep Flow Technique): IPA Concept Analysis on DFT (Deep Flow Technique) Hydroponic Systems', *Jurnal Sintesis: Penelitian Sains, Terapan dan Analisisnya*, 4(1). Available at: <https://doi.org/10.56399/jst.v4i1.92>.
- Zhang, M. *et al.* (2023) 'Biochar and Nitrogen Fertilizer Change the Quality of Waxy and Non-Waxy Broomcorn Millet (*Panicum miliaceum* L.) Starch', *Foods*, 12(16), p. 3009. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods12163009>.

BAB 13

UNSUR-UNSUR MIKRO KIMIA TANAH

Oleh Aliyah Fahmi

13.1 Pendahuluan Tentang Unsur-unsur Mikro Kimia Tanah

Ada beberapa unsur kimia tanah yang dibutuhkan dalam jumlah yang sangat sedikit sehingga disebut sebagai mikro kimia tanah atau mikronutrien. Unsur-unsur mikronutrien meliputi seng (Zn), besi (Fe), mangan (Mn), boron (B), klorin (Cl), tembaga (Cu), molibdenum (Mo), kobalt (Co), vanadium (V), natrium (Na), silikon (Si) dan nikel (Ni). Nikel merupakan mikronutrien tanaman yang paling baru ditemukan. Fungsinya dalam tanaman adalah sebagai kofaktor untuk mengubah urea menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Kekurangan nikel pada tanaman sangat jarang terjadi tetapi dapat muncul sebagai nekrosis daun (akibat penumpukan urea) dan kemungkinan besar ditemukan pada tanah dengan pH tinggi. Apabila tanah kekurangan nikel, pupuk nikel sulfat dapat ditambahkan.

Istilah mikronutrien tidak menyiratkan bahwa semua unsur ini akan terdapat dalam jumlah yang sangat sedikit di litosfer atau di tanah. Faktanya, 2 dari unsur mikronutrien, Fe dan Mn, termasuk di antara unsur yang paling melimpah di litosfer. Unsur mikro yang tersisa terdapat pada konsentrasi kurang dari 0,1% di litosfer dan dapat disebut sebagai unsur minor atau unsur jejak.

Keberadaan unsur hara mikro dalam tanah umumnya mencerminkan pengaruh jenis dan usia bahan induk, kondisi iklim selama pelapukan dan pembentukan tanah, vegetasi, dan faktor pembentuk tanah lainnya. Kandungan unsur hara mikro dalam tanah dapat pula dipengaruhi oleh kegiatan pertambangan atau industri. Di lahan pertanian, kandungan unsur hara mikro dapat dipengaruhi oleh penggunaan pupuk, seperti fosfat, yang mengandung sedikit unsur hara mikro. Di daerah tropis, di mana tingkat penggunaan pupuk umumnya rendah, pemupukan saat ini tidak dianggap sebagai penyumbang utama kandungan unsur hara mikro dalam tanah.

Hubungan antara kandungan total dan kandungan mikronutrien yang tersedia bagi tanaman di tanah cukup rumit, dan berbeda di antara unsur-unsur mikronutrien. Kandungan total mikronutrien, yang mencerminkan pengaruh bahan induk dan pembentukan tanah, cukup stabil seiring waktu. Kandungan mikronutrien yang tersedia di tanah lebih dinamis; kandungan tersebut bergantung pada kondisi tanah dan iklim selama musim tanam dan dapat berubah seiring waktu dan kedalaman profil tanah (Harmsen & Vlek, 1985).

Setiap mikronutrien memainkan peran penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman, kesehatan manusia, dan hewan. Penipisan mikronutrien dari tanah telah memperburuk kurangnya aplikasi pupuk yang mengandung mikronutrien, amandemen organik seperti pupuk kandang dan kompos, dan penggunaan lahan marjinal untuk produksi tanaman. Ketersediaan mikronutrien dalam tanah dan sistem tanaman terutama diatur oleh pH tanah, kandungan bahan organik, kadar kapur, tekstur tanah, kapasitas tukar kation (KTK), erosi, kelembaban tanah, suhu, dan ekologi tanaman, praktik pengelolaan tanaman yang diikuti.

Untuk pengelolaan mikronutrien yang baik dalam tanah diperlukan pengetahuan ilmiah yang memadai tentang hubungan yang ada antara berbagai makronutrien dan mikronutrien dan dalam berbagai mikronutrien. Dalam situasi agro-ekologi tertentu, perlu dirancang teknologi formulasi pupuk khusus untuk produksi dan produktivitas optimalnya.

Memenuhi populasi yang terus bertambah saat ini memerlukan kebijakan yang tepat untuk menciptakan kekhawatiran di antara masyarakat petani untuk menentukan kekurangan mikronutrien secara tepat, dan memastikan pemupukan yang seimbang, yang khususnya diperlukan untuk menjaga kesehatan tanah beserta keamanan tanaman (Adhikary et al., n.d.).

13.2 Manfaat dari Unsur unsur Mikro Kimia Tanah

Mikro kimia tanah dibutuhkan dalam jumlah yang sangat sedikit. Konsentrasi yang cukup pada tanaman umumnya di bawah level 100 bagian per juta (ppm). Mikro kimia tanah esensial adalah seng (Zn), besi (Fe), mangan (Mn), boron (B), klorin (Cl), tembaga (Cu), molibdenum (Mo), kobalt (Co), vanadium (V), natrium (Na), silikon (Si) dan nikel (Ni). Kekurangan Si, Na, V dan Co sangat jarang terjadi. Na mungkin hanya esensial bagi beberapa tanaman yang tumbuh di tanah salin.

Si dapat dianggap lebih sebagai nutrisi sekunder atau makro tetapi "kuasiesensial" karena telah terbukti meningkatkan pertumbuhan dalam eksperimen laboratorium tertentu tetapi tanaman yang tumbuh tanpa Si tetap tumbuh subur. Si berada di urutan kedua setelah oksigen dalam kelimpahannya di tanah karena sebagian besar mineral tanah adalah silikat atau aluminosilikat.

Mikro kimia tanah yang dapat dimanfaatkan oleh praktisi agronomi dan orang-orang yang memproduksi tanaman pangan adalah seng (Zn), besi (Fe), mangan (Mn), boron (B), klorin (Cl), tembaga (Cu), dan molibdenum (Mo). Seng kemungkinan merupakan mikronutrien yang paling umum dan jumlahnya terbatas. Besi mungkin merupakan yang paling sulit diperoleh karena dibutuhkan dalam jumlah yang relatif besar dan proses kimia tanah terkadang membuatnya tidak tersedia dengan cepat. Mengetahui cara kerja suatu unsur dalam tanaman dan beberapa interaksi kimia tanah yang terkait dengannya membantu mendiagnosis masalah dan menentukan solusinya.

13.2.1 Seng (Zinc)

Seng merupakan mikronutrien yang paling sering dibutuhkan oleh tanaman pangan barat. Tanaman jeruk biasanya diberi perlakuan seng melalui daun satu kali atau lebih per tahun. Tanaman pohon lainnya, anggur, kacang-kacangan, bawang, tomat, kapas, padi, dan jagung umumnya memerlukan pemupukan seng. Tidak seperti ion logam lainnya seperti tembaga, besi, dan mangan, seng merupakan kation divalen (Zn^{++}) yang tidak mengalami perubahan valensi dan karenanya tidak memiliki aktivitas redoks pada tanaman. Konsentrasi tinggi kation divalen lainnya seperti Ca^{++} sedikit menghambat penyerapan seng. Seng bertindak sebagai komponen logam enzim atau sebagai kofaktor fungsional, struktural, atau regulatori sejumlah besar enzim. Lebih dari 80 protein yang mengandung seng telah dilaporkan. Laju sintesis protein dan kandungan protein tanaman yang kekurangan seng berkurang drastis. Akumulasi asam amino dan amida pada tanaman ini menunjukkan pentingnya seng untuk sintesis protein.

Seng merupakan komponen penting RNA polimerase dan jika seng dihilangkan, enzim tersebut akan dinonaktifkan. Seng juga merupakan bagian dari ribosom dan penting untuk integritas strukturalnya. Penurunan kandungan protein pada tanaman yang kekurangan seng juga merupakan hasil dari peningkatan laju degradasi RNA. Laju aktivitas RNase yang lebih tinggi merupakan ciri khas kekurangan seng. Aplikasi pupuk fosfor dalam jumlah besar pada tanah yang rendah seng dapat menyebabkan kekurangan seng dan meningkatkan kebutuhan seng pada tanaman. Sebagian dari kekurangan yang disebabkan mungkin disebabkan oleh penghambatan penyerapan oleh kation divalen lain atau pengenceran seng tanaman karena peningkatan pertumbuhan dari fosfor yang ditambahkan. Proses kimia tanah dapat menyebabkan peningkatan penyerapan seng

pada hidroksida dan oksida besi dan aluminium serta CaCO_3 .

Beberapa hasil percobaan menunjukkan bahwa ada interaksi fosfor-seng tambahan pada tanaman, termasuk penghambatan translokasi seng dari akar ke pucuk dan "inaktivasi fisiologis" seng di dalam pucuk. Saran terakhir didasarkan pada pengamatan bahwa gejala kekurangan seng berhubungan dengan rasio fosfor/seng daripada dengan konsentrasi seng pada pucuk. Interaksi fosfor-seng di tanah diperumit oleh infeksi akar dengan mikoriza vesikular-arbuskular. Akar yang terinfeksi menyerap lebih banyak seng daripada akar yang tidak terinfeksi. Infeksi mikoriza pada akar sangat ditekan oleh peningkatan pasokan fosfor.

Ada beberapa bukti bahwa seng mungkin berperan dalam mengurangi toksisitas fosfor. Hasil percobaan dengan okra menunjukkan kadar fosfor yang beracun pada daun tanaman yang tumbuh tanpa seng yang cukup. Meskipun hubungan antara kekurangan seng dan toksisitas fosfor tidak dipahami dengan baik, ada bukti substansial bahwa seng memengaruhi metabolisme fosfor di akar dan meningkatkan permeabilitas membran plasma sel akar terhadap fosfor dan klorida. Seng menstabilkan biomembran dan karena itu mungkin memiliki fungsi khusus dalam orientasi struktural makromolekul di dalam membran dan dengan demikian dalam integritas membran.

13.2.2 Besi (Fe)

Besi (Fe) diperlukan untuk pembentukan klorofil dalam sel tanaman. Zat besi berfungsi sebagai aktivator untuk proses biokimia seperti respirasi, fotosintesis, dan fiksasi nitrogen simbiotik. Kekurangan zat besi dapat disebabkan oleh kadar mangan yang tinggi atau kandungan kapur yang tinggi dalam tanah. Zat besi diserap oleh tanaman sebagai ion ferro (Fe^{2+}) atau ferri (Fe^{3+}). Fungsi zat besi dalam tanaman bergantung pada

transisi yang siap antara dua keadaan oksidasinya dalam larutan. Tanaman menyimpan zat besi sebagai feritin, protein yang membungkus zat besi ferri.

Dalam kondisi tanah aerobik, zat besi sebagian besar tidak larut sebagai penyusun oksida dan hidroksida. Zat besi ferri cenderung terikat dalam kelat organik. Oleh karena itu, konsentrasi zat besi bebas dalam larutan tanah sangat rendah di banyak tanah. Tanaman memiliki mekanisme untuk memobilisasi zat besi dan membuatnya tersedia untuk diserap oleh akarnya. Beberapa mekanisme ini tidak khusus untuk penyerapan zat besi. Akar mengeluarkan proton dan dengan demikian menurunkan pH rizosfer: semakin rendah pH, semakin tinggi kelarutan dan ketersediaan zat besi. Akar juga melepaskan asam organik ke dalam tanah. Hal itu memiliki efek ganda pada ketersediaan zat besi: menurunkan pH eksternal dan asam dapat membentuk kompleks yang larut dengan zat besi.

Ada dua mekanisme khusus untuk penyerapan zat besi. Yang pertama (ciri tumbuhan dikotil dan monokotil non-gramina) mengasamkan rizosfer dengan mengeluarkan proton. Zat besi ferri direduksi menjadi zat besi fero oleh enzim reduktase Fe^{3+} yang dapat diinduksi pada membran plasma. Zat besi yang direduksi diangkut melintasi membran oleh sistem pengangkutan ion spesifik Fe^{2+} . Mekanisme kedua (ciri tumbuhan jagung, jelai, dan gandum) melibatkan pengeluaran siderofor (bahasa Yunani yang berarti "pembawa zat besi") oleh akar. Tidak terjadi reduksi menjadi zat besi fero.

13.2.3 Mangan (Mn)

Mangan berfungsi sebagai aktivator enzim dalam proses pertumbuhan. Mangan membantu zat besi dalam pembentukan klorofil. Mangan merupakan bagian dari sistem tempat air dipecah dan gas oksigen dibebaskan. Pemecahan air merupakan oksidasi, yaitu $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$. Protein lain yang mengandung mangan sebagai

konstituen integral adalah superoksida dismutase yang mengandung mangan. Enzim ini tersebar luas dalam organisme aerobik. Fungsi enzim ini adalah untuk memberikan perlindungan dari radikal oksigen bebas yang terbentuk saat O_2 menerima satu elektron. Superoksida dismutase mengubah radikal bebas yang sangat beracun ini menjadi hidrogen peroksida (H_2O_2) yang kemudian dipecah menjadi air.

Konsentrasi mangan yang tinggi dapat menyebabkan defisiensi zat besi. Penyerapan mangan terutama dalam bentuk Mn^{++} . Mangan umumnya dibutuhkan bersama seng dalam penyemprotan daun jeruk. Tanaman pohon lain mungkin menunjukkan defisiensi, tetapi selain itu tidak ada pengakuan umum tentang kebutuhan untuk elemen ini. Terdapat semakin banyak pengetahuan yang menunjukkan bahwa penambahan mangan dapat meningkatkan hasil kedelai yang tahan terhadap glifosat.

13.2.4 Boron (B)

Boron berfungsi dalam diferensiasi sel meristem pada tanaman. Konsensus umum adalah bahwa fungsi utamanya berkaitan dengan struktur dinding sel dan zat yang terkait dengannya. Boron hadir dalam larutan tanah dengan pH kurang dari 8 terutama sebagai asam borat yang tidak terdisosiasi ($B(OH)_3$), bentuk utama yang diserap oleh akar, dan terdisosiasi menjadi $B(OH)_4$ hanya pada nilai pH yang lebih tinggi.

Kekurangan boron merupakan gangguan nutrisi yang tersebar luas. Dalam kondisi curah hujan tinggi, boron mudah tercuci dari tanah sebagai $B(OH)_3$. Ketersediaan boron menurun seiring dengan meningkatnya pH tanah, terutama pada tanah berkapur dan tanah dengan kandungan tanah liat yang tinggi. Ketersediaan juga menurun tajam dalam kondisi kekeringan, mungkin karena penurunan mobilitas boron oleh aliran massa ke akar dan polimerisasi asam borat.

13.2.5 Klorin (Cl)

Klorin adalah mineral yang aneh. Konsentrasi normalnya pada tanaman lebih khas dari makronutrien, sedangkan kebutuhan klorin untuk pertumbuhan lebih mirip dengan mikronutrien. Klorin ada di mana-mana di alam dan terdapat dalam larutan berair sebagai klorida (Cl^-). Bukti menunjukkan bahwa klorin sangat mudah bergerak dan fungsi utamanya pada tanaman tingkat tinggi terkait dengan kompensasi muatan dan osmoregulasi. Karena klorin biasanya dipasok ke tanaman dari berbagai sumber (cadangan tanah, hujan, pupuk, dan polusi udara), ada lebih banyak kekhawatiran tentang kadar racun daripada kekurangan. Meskipun demikian, beberapa kasus telah dicatat tentang respons positif terhadap aplikasi klorida sebagai pupuk untuk gandum.

13.2.6 Tembaga (Cu)

Tembaga hadir dalam tanaman dalam bentuk kompleks. Seperti logam berat lain yang berpotensi beracun, tembaga yang berlebihan terikat pada fitokelatin (bahasa Yunani yang berarti "cakar tanaman") dan peptida yang mengandung sulfur. Tembaga dalam larutan hadir sebagai kupro (Cu^+) dan kupri (Cu^{++}). Tembaga kupri mudah teroksidasi menjadi kupri, sehingga tembaga kupri hanya ditemukan dalam bentuk kompleks. Kompleks kupri biasanya tidak berwarna, sedangkan kompleks kupri sering berwarna biru atau cokelat.

Tembaga merupakan aktivator beberapa sistem enzim dalam tanaman dan berfungsi dalam transpor elektron dan penangkapan energi oleh protein oksidatif dan enzim. Tembaga mungkin berperan dalam produksi vitamin A. Kekurangan tembaga mengganggu sintesis protein. Pasokan tembaga asli jarang diketahui membutuhkan suplementasi. Beberapa tanaman pohon yang tumbuh di tanah organik atau pasir mungkin memerlukan suplementasi. Tembaga dapat menjadi

racun pada tingkat rendah, sehingga kebutuhan harus dipastikan sebelum suplementasi. Gejala kekurangan sangat bervariasi di antara spesies.

13.2.7 Molibdenum (Mo)

Meskipun molibdenum adalah logam, ia muncul dalam larutan berair terutama sebagai anion molibdat, MoO_4^- . Molibdat tampaknya relatif mudah bergerak dalam tanaman dan konsentrasi yang lebih tinggi dapat ditemukan di akar daripada daun ketika persediaan terbatas. Konsentrasi daun dapat meningkat saat persediaan molibdenum meningkat. Kebutuhan molibdenum adalah yang terendah dari semua mineral kecuali, pada spesies tertentu, nikel.

Fungsi molibdenum sebagai nutrisi tanaman terkait dengan perubahan valensi yang dialaminya sebagai komponen logam enzim. Hanya beberapa enzim yang ditemukan mengandung molibdenum dalam tanaman. Pada tanaman tingkat tinggi, dua enzim yang mengandung molibdenum, nitrogenase dan nitrat reduktase, sangat penting dalam produksi tanaman. Semua sistem biologis yang mengikat N_2 memerlukan nitrogenase.

Setiap molekul nitrogenase mengandung dua atom molibdenum, yang dikaitkan dengan zat besi. Oleh karena itu, kebutuhan bintil akar relatif tinggi. Seperti yang diharapkan, pertumbuhan tanaman yang bergantung pada fiksasi N_2 khususnya dirangsang oleh pemberian molibdenum pada tanah yang kekurangan. Respons aktivitas bintil akar terhadap molibdenum sangat spektakuler dan secara tidak langsung mencerminkan peningkatan kapasitas fiksasi N_2 yang disebabkan oleh penambahan molibdenum.

Pada tanah dengan ketersediaan molibdenum rendah, efek pemberian molibdenum pada legum bergantung pada bentuk pasokan nitrogen (N_2 terfiksasi atau pupuk N anorganik yang ditambahkan). Peningkatan

hasil kedelai yang terinfeksi rhizobium secara memadai dari penambahan molibdenum akan lebih tinggi jika pupuk nitrogen tidak ditambahkan karena fiksasi N_2 difasilitasi oleh molibdenum. Molibdenum berfungsi sebagai kofaktor untuk enzim nitrat reduktase. Kekurangan molibdenum mengurangi aktivitas nitrat reduktase, yang menghambat kemampuan tanaman untuk mensintesis protein.

13.3 Dampak Defisiensi dari Unsur-unsur Mikro Kimia Tanah

Mikronutrien merupakan persentase kecil dari keseluruhan tanaman, tetapi sangat penting untuk pertumbuhan. Sebagian besar digunakan dalam enzim, bukan komponen struktural tanaman. Kasus ekstrem, seperti nilai pH ekstrem, tanah gambut, atau kondisi tidak biasa lainnya, membuat defisiensi lebih mungkin terjadi. Karena defisiensi diatasi dengan jumlah kecil per area, defisiensi dapat ditambahkan ke campuran atau strategi lain yang memungkinkan penyebaran lebih efektif. Bahan seperti pupuk kandang atau kompos dapat digunakan, tergantung pada analisis (Blauwet et al., 2024).

Unsur-unsur mikro kimia tanah selain memiliki manfaat namun ada beberapa dampak negatif apabila kadarnya kurang memadai sesuai kebutuhan tanah. Adapun gejala-gejala kekurangan unsur-unsur kimia tanah tersebut antara lain:

13.3.1 Seng (Zinc)

Kekurangan seng tersebar luas di antara tanaman yang tumbuh di tanah asam yang sangat lapuk dan di tanah berkapur. Dalam kasus terakhir, kekurangan seng sering dikaitkan dengan kekurangan zat besi. Ketersediaan seng yang rendah di tanah berkapur dengan pH tinggi terutama disebabkan oleh penyerapan seng ke tanah liat atau $CaCO_3$. Selain itu, penyerapan dan translokasi seng ke pucuk sangat dihambat oleh konsentrasi bikarbonat (HCO_3^-) yang tinggi. Berbeda

dengan kekurangan zat besi, kekurangan seng dapat diperbaiki dengan cukup mudah dengan pemberian garam seng seperti ZnSO_4 ke tanah.

Gejala kekurangan seng pada tanaman meliputi:

1. Penurunan panjang batang dan pemendekan ruas, roset daun terminal.
2. Pembentukan kuncup buah berkurang.
3. Daun berbintik-bintik, klorosis interveinal. Terkadang, perubahan warna seperti bintik merah (disebabkan oleh antosianin) pada daun sering terjadi. Gejala klorosis dan nekrosis pada daun tua pada tanaman yang kekurangan seng kemungkinan besar merupakan akibat dari keracunan fosfor.
4. Ranting mati setelah tahun pertama.
5. Daun jagung bergaris atau bergaris-garis.

13.3.2 Besi (Fe)

Tanaman yang sering terkena defisiensi zat besi adalah jagung, sorgum, varietas kedelai tertentu, rumput, dan tanaman pohon serta tanaman hias tertentu.

Gejala defisiensi zat besi meliputi:

1. Klorosis interveinal pada daun muda. Vena tetap hijau kecuali pada kasus yang parah.
2. Ranting mati.
3. Pada kasus yang parah, seluruh dahan atau tanaman mati.

13.3.3 Mangan (Mn)

Gejala kekurangan mangan meliputi:

1. Klorosis interveinal pada daun muda. Gradasi warna hijau pucat dengan warna lebih gelap di dekat urat daun. Tidak ada perbedaan yang jelas antara urat daun dan area interveinal seperti pada kekurangan zat besi.

2. Munculnya bintik abu-abu (gandum), garis putih interveinal (gandum), atau bintik dan garis cokelat interveinal (barley).

13.3.4 Boron (B)

Kekurangan boron merupakan gangguan nutrisi yang tersebar luas. Dalam kondisi curah hujan tinggi, boron mudah tercuci dari tanah sebagai $B(OH)_3$. Ketersediaan boron menurun seiring meningkatnya pH tanah, terutama di tanah berkapur dan tanah dengan kandungan tanah liat yang tinggi. Ketersediaan juga menurun tajam dalam kondisi kekeringan, mungkin karena penurunan mobilitas boron oleh aliran massa ke akar dan polimerisasi asam borat.

Gejala kekurangan boron pada tunas terlihat pada kuncup terminal atau daun termuda, yang berubah warna dan dapat mati. Ruasnya lebih pendek, sehingga tanaman tampak seperti semak atau roset. Kekurangan ditemukan terutama pada jaringan tanaman termuda. Klorosis interveinal pada daun dewasa dapat terjadi, seperti halnya helaian daun yang tidak berbentuk. Gugurnya kuncup, bunga, dan buah yang sedang berkembang juga merupakan gejala khas kekurangan boron.

Dengan kekurangan boron, sel dapat terus membelah, tetapi komponen struktural tidak berdiferensiasi. Boron juga tampaknya mengatur metabolisme karbohidrat tanaman. Boron bersifat non-mobil pada tanaman, dan pasokan berkelanjutan diperlukan di semua titik pertumbuhan.

13.3.5 Klorin (Cl)

Gejala kekurangan klorin meliputi:

1. Daun muda tampak biru kehijauan mengilap.
2. Layu, diikuti klorosis.
3. Akar lateral bercabang berlebihan.
4. Daun berwarna kecokelatan.
5. Klorosis dan nekrosis pada tomat dan jelai.

13.3.6 Tembaga (Cu)

Pasokan tembaga asli hanya jarang diketahui membutuhkan suplementasi. Beberapa tanaman pohon yang tumbuh di tanah organik atau pasir mungkin memerlukan suplementasi. Tembaga dapat menjadi racun pada tingkat rendah sehingga kebutuhan harus dipastikan sebelum suplementasi.

Gejala kekurangan sangat bervariasi di antara spesies. Gejala kekurangan tembaga meliputi:

1. Daun mungkin klorosis atau hijau kebiruan tua dengan tepi menggulung.
2. Kulit pohon sering kasar dan melepuh, dan getah dapat keluar dari celah-celah di kulit.
3. Tunas muda mati.
4. Pembungaan dan pembuahan mungkin gagal berkembang pada tanaman tahunan dan mereka mungkin mati pada tahap pembibitan.
5. Pertumbuhan terhambat.
6. Pembentukan kantong getah di sekitar empulur tengah pada jeruk.

13.3.7 Molibdenum (Mo)

Gejala kekurangan molibdenum meliputi:

1. Klorosis interveinal. Vena-vena tetap hijau sehingga tampak berbintik-bintik.
2. Pertumbuhan kerdil dan kurang bersemangat. Hal ini mirip dengan kekurangan nitrogen karena peran utama molibdenum dalam pemanfaatan nitrogen oleh tanaman.
3. Daun hangus dan melengkung atau menggulung.

Apabila defisiensi mikronutrien didiagnosis, uji tanah dapat dilengkapi dengan uji jaringan. Bersama-sama, kedua alat tersebut akan memberikan gambaran yang lebih lengkap.

13.4 Pemilihan Aplikasi dari Unsur-unsur Mikro Kimia Tanah

Baik perawatan maupun pencegahan dari defisiensi mikronutrien tidaklah rumit atau mahal. Hambatan pada hasil panen dan pemborosan waktu serta sumber daya yang disebabkan oleh defisiensi tersebut sangat merugikan. Mengetahui bagaimana mikronutrien berperilaku dalam tanaman dan tanah akan membantu menentukan apakah perlu mengambil tindakan perbaikan atau pencegahan. Hal tersebut benar-benar tergantung pada bagaimana dan kapan membuat diagnosis.

Aplikasi tanah hampir selalu lebih efektif dan ekonomis daripada daun. Namun, jika masalah muncul setelah tanaman muncul, maka perawatan daun adalah solusi yang logis. Uji jaringan memberikan bukti tambahan tentang suatu masalah tetapi mungkin tidak memberikan gambaran yang lengkap. Uji tersebut akan melengkapi uji tanah. Namun, uji tanah juga tidak akan memberikan representasi yang sepenuhnya akurat.

Secara umum, uji tanah mikronutrien akan memberikan indikator nutrisi yang berpotensi tersedia atau memberikan jumlah total yang ditemukan. Uji tanah mikronutrien biasanya tidak mengalami upaya korelasi dan kalibrasi seperti yang dialami makronutrien. Hal ini bukan berarti bahwa mereka salah atau sama sekali tidak akurat, tetapi mereka akan lebih berfungsi sebagai pedoman dan pemverifikasi kemampuan suatu lahan.

Berikut ini disajikan tabel konsentrasi dan kisaran kecukupan unsur hara terpilih pada tanaman.

Tabel 13. 1. Konsentrasi Dan Kisaran Kecukupan Unsur Hara Terpilih Pada Tanaman (Berdasarkan Berat Kering)

Nama unsur	Simbol	Kisaran Konsentrasi	Konsentrasi yang layak
Nickel	Ni	0.05-5 ppm	0.05 ppm
Molybdenum	Mo	0.10-10 ppm	0.10 ppm
Cobalt	Co	0.05-10 ppm	0.10 ppm

Nama unsur	Simbol	Kisaran Konsentrasi	Konsentrasi yang layak
Copper	Cu	2-50 ppm	6 ppm
Zinc	Zn	10-250 ppm	20 ppm
Sodium	Na	0.001-8 %	10 ppm
Manganese	Mn	10-600 ppm	50 ppm
Boron	B	0.2-800 ppm	20 ppm
Iron	Fe	20-600 ppm	100 ppm
Chlorine	Cl	10-80,000 ppm	100 ppm
Silicon	Si	0.10%-10%	0.10%
Sulfur	S	0.10%-1.50%	0.10%
Phosphorus	P	0.15%-0.50%	0.20%
Magnesium	Mg	0.05%-1%	0.20%
Calcium	Ca	0.10%-6%	0.50%
Potassium	K	0.80%-8%	1.00%
Nitrogen	N	0.5%-6%	1.50%
Oxygen	O	45%	
Carbon	C	45%	
Hydrogen	H	6%	

Konsentrasi mikronutrien tanah telah terbukti sangat bervariasi di suatu lahan. Penting untuk memperoleh sampel tanah yang representatif untuk analisis. Ada banyak sekali produk mikronutrien yang tersedia. Contohnya adalah mangan yang dikelat. Kelat mangan, bila diterapkan pada tanah yang mengandung banyak zat besi, biasanya tidak efektif karena zat besi yang tersedia menggantikan Mn dalam kelat. Mangan dikeluarkan ke dalam kompleks kimia tanah dan menjadi tidak tersedia. Terkadang, faktor efisiensi diterapkan pada kelat.

Ada bukti bahwa perbedaan dalam ketersediaan tanaman dari berbagai produk, sebagai contoh dari para peneliti di Colorado melakukan studi rumah kaca untuk menyelidiki apakah ada hubungan antara seng yang tersedia bagi tanaman dan jumlah seng yang larut dalam air dalam berbagai pupuk. Mereka menemukan bahwa tanaman yang tumbuh di tanah

yang kekurangan seng meningkatkan hasil dan menyerap seng secara langsung sebanding dengan tingkat seng yang larut dalam air dalam bahan pupuk. Dalam hal ini, studi rumah kaca berlaku untuk kondisi lapangan dan memverifikasi hubungan yang positif. Efisiensi juga terkait dengan metode aplikasi.

Pelaporan beberapa mikronutrien tidak direkomendasikan karena tingkat penggunaannya sangat rendah. Namun, penyiaran mungkin menjadi satu-satunya alternatif dalam beberapa sistem. Anda dapat memperkirakan bahwa bentuk kelat (jika tersedia) cenderung lebih banyak bergerak di dalam tanah daripada yang tidak kelat. Hal ini mungkin sangat penting dalam sistem tanpa olah tanah di mana starter tidak digunakan (Na, 2007).

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikary, S., Das, P., Paramanik, B., & Roy, D. (n.d.). Chapter functions of micronutrients in the soil-plant system and their management towards sustainable agriculture. *Insights Agric Sci*, 127.
- Blauwet, M., Miguez, F., McDaniel, M. D., Villarino, S. H., & Emmett, B. (2024). Carbon and Nitrogen Dynamics in Soils Amended with Anaerobic Digestate. *ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting*.
- Harmsen, K., & Vlek, P. L. G. (1985). The chemistry of micronutrients in soil. In *Micronutrients in tropical food crop production* (pp. 1–42). Springer.
- Na, S. (2007). Micronutrients: functions, sources and application methods. *Carbon NY*, 100, 45.

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. Adapun buku-buku yang sudah diterbitkan adalah : Inovasi Teknologi Biochar dan Bokashi pada Tanaman Kedelai di Tanah Suboptimal Basah Secara Berkelanjutan (Maret, 2024), Biokompos Kunci Pengelolaan Lahan Suboptimal (Maret, 2024), Dasar Ilmu Tanah (Juli 2024), Ilmu Tanah (Agustus, 2024) dan Pupuk dan Pemupukan (Oktober, 2024).

BIODATA PENULIS



Ismail Astar, S.Si., M.Si.

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

Ismail Astar lahir di Parit Pangeran 16 Juni 1986. Menyelesaikan Pendidikan S1 pada tahun 2011 dan S2 pada tahun 2017 di Universitas Tanjungpura Pontianak pada bidang Studi Kimia dengan fokus kajian katalis dalam pembuatan dan produksi biodisel. Aktivitas saat ini menjadi tenaga pengajar pada bidang Kimia dan Kimia Fisika Tanah Jurusan Agroteknologi Fakultas Pertanian, Sains dan Teknologi Universitas Panca Bhakti Pontianak.

Penulis juga aktif menulis dalam jurnal ilmiah internasional dan nasional terutama yang berkaitan dengan bidang pertanian diantaranya Maximizing cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedling growth through liquid coconut shell smoke in Ultisols soil (2024), Role of biochar amendments in improving the properties of acid sulphate soil (2022), Use of Balanced Fertilizer Doses and Pruning Methods to Increase Growth and Yield of Rice Plants in Acidic Sulphate Lands in West Borneo (2023), Penggunaan *Streptomyces Ambofaciens* sebagai Bioaktivator dalam Pembuatan Pupuk Organik Cair

dari Limbah Organik (2022), Enkapsulasi Urea Menggunakan Biokomposit Zeolit Alam-Alginat-Pati Sagu sebagai Model Pupuk Lepas Lambat (Slow Release Fertilizer) (2022), Enkapsulasi Urea Pada Lumpur PDAM-Alginat sebagai Pupuk Lepas Lambat (2022) dan lain-lain. Korespondensi bisa dilakukan melalui alamat email: ismailastar@gmail.com, atau bisa melalui Facebook Ismail doank dan twitter @ismail_astar.

BIODATA PENULIS



Sjamsiah, S.Si, M.Si.,Ph.D

Dosen Program Studi Kimia
Fakultas Sain dan Teknologi
UIN Alauddin

Penulis, lahir di Ujung Pandang, Provinsi Sulawesi Selatan pada tanggal 22 Juli 1968. Penulis merupakan anak kedua dari delapan bersaudara dari pasangan Nuhung dan Naharia. Penulis menempuh pendidikan dasar pada SD Negeri Karuwisi II Ujung Pandang mulai tahun 1976 sampai tahun 1982, kemudian melanjutkan Pendidikan di SMP Negeri 10 Ujung Pandang dan tamat tahun 1985. Selanjutnya di Sekolah Analis Kimia Menengah Atas (SAKMA) Ujung Pandang dan tamat pada tahun 1989. Tahun 1989 melanjutkan pendidikan Strata Satu (S1) di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Hasanuddin Makassar. Pada tahun 1998 diterima bekerja sebagai dosen kimia di FMIPA Unhalu dan sekarang sebagai dosen kimia di Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar. Tahun 1999 melanjutkan Strata Dua (S2) di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada dan Strata Tiga (S3) di Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) dan mendapat gelar Ph.D pada tahun 2014.

BIODATA PENULIS



Merpiseldin Nitsae, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Kristen Artha Wacana

Penulis lahir di Siso (kab. Timor Tengah Selatan, NTT) tanggal 30 September 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi FKIP, Universitas Kristen Artha Wacana. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia, Universitas Nusa Cendana dan melanjutkan S2 pada Program Studi Ilmu Kimia, Universitas Brawijaya. Penulis menekuni bidang Kimia Analitik.

BIODATA PENULIS



Nani Kitti Sihaloho, M.P.

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Peternakan dan Pertanian
Universitas Diponegoro

Penulis lahir di Dairi, Sumatera Utara 05 April 1990, penulis adalah Dosen Tetap di Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Peternakan dan Pertanian, Universitas Diponegoro. Penulis Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agroekoteknologi di Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara (2012) dan melanjutkan S2 pada Program Studi Agroekoteknologi di Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara (2015). Mata kuliah yang diampu diantaranya Dasar Ilmu Tanah, Kesuburan Tanah dan Pemupukan, Kimia Tanah, Survei Tanah dan Evaluasi Kesesuaian Lahan. Penulis aktif melakukan penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat. Peneliti menekuni penelitian di bidang Ilmu Tanah sejak penyusunan skripsi, tesis dan sampai sekarang. Fokus topik yang diteliti yakni Evaluasi Kesuburan Tanah dalam Pemulihan Lahan.

BIODATA PENULIS



Dr. Waode Rustiah, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medis
Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Pangkep pada tanggal 30 Januari 1979. Penulis bertugas sebagai staf pengajar di Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis, Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 2002 pada Jurusan Kimia di Universitas Hasanuddin, dan melanjutkan S2 pada tahun 2005 di Institut Teknologi Bandung (ITB) pada bidang konsentrasi Kimia Analitik. Pada tahun 2019 telah menyelesaikan pendidikan S3 pada Program Doktor Ilmu Kimia di Universitas Hasanuddin.

BIODATA PENULIS



Dr. Eso Solihin, SP.,MP

Dosen Program Studi Agroteknologi Departemen Ilmu Tanah
dan Sumberdaya Lahan Fakultas Pertanian
Universitas Padjadjaran

Penulis merupakan seorang staf pengajar di Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran pada program studi Agroteknologi Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan. Menyelesaikan pendidikan sarjana dan magister di Universitas Padjadjaran, serta Program Doktorat pada Program Studi Ilmu Tanah Di Institut Pertanian Bogor. Penulis Memiliki keahlian dalam bidang kesuburan tanah dan nutrisi tanaman, serta berpengalaman dalam mengajar dasar-dasar ilmu tanah, kimia tanah dan nutrisi tanaman, pupuk dan pemupukan, pengelolaan tanah dan air serta teknologi media tanam. Kepakaran berfokus pada manajemen nutrisi hara dan kesuburan tanah. E-mail: eso.solihin@unpad.ac.id.

BIODATA PENULIS



Ida Ayu Suci, S.Pd., M.Si

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian, Sains, dan Teknologi

Penulis lahir di Mempawah Kalimantan Barat tanggal 22 Mei 1988. Menyelesaikan pendidikan sebagai Sarjana Pendidikan Kimia di Universitas Tanjungpura angkatan 2006, kemudian melanjutkan studi Magister Kimia di Institut Pertanian Bogor (IPB) angkatan 2013. Selama mengembangkan ilmu di IPB, penulis aktif dalam organisasi IMAPASKA IPB. Selain itu penulis juga aktif mengikuti organisasi Gita Swara Pascasarjana IPB. Saat ini, penulis merupakan dosen tetap Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian, Sains, dan Teknologi Universitas Panca Bhakti. Penulis aktif sebagai pengurus dalam organisasi Alumni Bisnis Cendekia Himpunan Alumni Insitut Pertanian Bogor (ABC HA IPB Chapter Kalimantan Barat). Penulis juga aktif sebagai tutor di Universitas Terbuka. Penulis juga tergabung sebagai Mediator di International Mediation and Arbitration Center (IMAC). Selain aktif mengajar, penulis juga aktif menulis jurnal ilmiah, menjadi pembicara di berbagai seminar internasional, terlibat

di berbagai organisasi keprofesian maupun organisasi kemasyarakatan serta pernah terlibat sebagai juri dalam beberapa lomba terkait keilmuan kimia.

BIODATA PENULIS

Mauritz Pandapotan Marpaung, S.Pd., M.Si.

Program Studi S1 Farmasi
STIKES Abdurahman Palembang

Penulis lahir di Medan tanggal 8 Juli 1981. Penulis adalah dosen PNS Dpk di Program Studi S1 Farmasi, STIKES Abdurahman, Palembang. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Kimia di Universitas Sriwijaya (Unsri) pada tahun 1999-2004 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia di Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2006-2008. Penulis menekuni bidang Menulis. Saat ini Penulis aktif melakukan pengajaran, penulisan buku, dan penelitian. Latar belakang publikasi dapat dilihat di google scholar: 60mTALsAAAAJ dan dapat dihubungi melalui email: *mauritzchem@gmail.com*.

BIODATA PENULIS



Anselmus Boy Baunsele, S.Pd., M.Sc
Dosen Program Studi Pendidikan Kimia
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Katolik Widya Mandira

Penulis lahir di Soe tanggal 14 April 1989. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pendidikan Kimia Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas katolik Widya Mandira. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Pendidikan Kimia Universitas Nusa Cendana tahun 2006-2011 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia Universitas Gadjah Mada 2013-2015. Penulis menekuni bidang Kimia Lingkungan dengan riset terkait adsorpsi logam berat dan zat warna di lingkungan memanfaatkan biosorben.

BIODATA PENULIS



Mulyadi, S.P., M.P.

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

Penulis adalah anak kesembilan dari sembilan bersaudara dan dilahirkan di Pemangkat pada 10 Agustus 1975. Fakultas Pertanian Sains dan Teknologi Universitas Panca Bhakti mempekerjakan penulis sebagai dosen tetap di Program Studi Agroteknologi. Menyelesaikan studi S1 di Agronomi dan melanjutkan studi S2 di Agroteknologi . Buku Sifat-Sifat Kimia Tanah ini adalah buku kedua yang ditulis oleh penulis. Buku ini ditulis untuk sebagai bahan bacaan bagi mahasiswa Fakultas Pertanian. Semoga dapat bermanfaat, Aamiin.

BIODATA PENULIS



Abdi Suprayitno, S.T., M.Eng

Dosen Program Studi Rekayasa Geologi
Sekolah Tinggi Teknologi Migas Balikpapan

Penulis lahir di Balikpapan tanggal 10 September 1985. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Rekayasa Geologi Sekolah Tinggi Teknologi Migas Balikpapan. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada dan melanjutkan S2 pada Program Studi Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada. Riset yang ditekuni saat ini adalah berkaitan dengan Mitigasi Bencana Geologi dan Airtanah. Selain Tridharma juga berkegiatan di komunitas wakaf produktif dan wirausaha. Terimakasih. Korespondensi dapat ke email abdi.sttmigas@gmail.com

BIODATA PENULIS**Dr. Aliyah Fahmi S.Si, M.Si**

Dosen Kimia

Universitas Efarina Pematang Siantar

Ketertarikan penulis terhadap ilmu kimia sejalan dengan studi Penulis yang berkaitan dengan Ilmu Kimia. Penulis memulai perkuliahan pada program studi D3 Analis Kimia di Universitas Sumatera Utara, yang dilanjutkan S1 Kimia pada tahun 2005 s/d 2007. Penulis kemudian melanjutkan perkuliahan pada jenjang magister di tahun 2014 s/d 2016, jenjang doctoral di tahun 2020 s/d 2024, dan menjadi Dosen Kimia di Universitas Efarina, Pematang Siantar. Penulis ditempatkan di Fakultas Kesehatan, tepatnya di Program Studi D3 Analis Kesehatan atau Analis Teknik Laboratorium Medik. Saat ini, Penulis sedang dalam studi S3 terkait Ilmu Kimia. Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh Penulis didanai oleh LPDP dan Kemenristek DIKTI. Selain menjadi Peneliti, Penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara Indonesia. Email Penulis: aliyahfahmi0984@gmail.com.