

Prof. Dr. Ir. Herviyanti, M.S.  
Dr. Ir. Teguh Budi Prasetyo, M.S.  
Amsar Maulana, S.P., M.P.  
Moli Monikasari, S.P.  
An Nisa Mutiara Fathi, S.P.

# TEKNOLOGI AMELIORASI TANAH MINERAL MASAM SECARA BERKELANJUTAN

Teknologi Ameliorasi  
Tanah Mineral Masam  
Secara Berkelanjutan

## UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# Teknologi Ameliorasi Tanah Mineral Masam Secara Berkelanjutan

Prof. Dr. Ir. Herviyanti, M.S.  
Dr. Ir. Teguh Budi Prasetyo, M.S.  
Amsar Maulana, S.P., M.P.  
Moli Monikasari, S.P.  
An Nisa Mutiara Fathi, S.P.



**TEKNOLOGI AMELIORASI TANAH MINERAL MASAM SECARA  
BERKELANJUTAN**

**Herviyanti, ... [et al.]**

Desain Cover :

**Syaiful Anwar**

Sumber :

www.shutterstock.com (kram-9)

Tata Letak :

**Zulita A.**

Proofreader :

**Tiara Nabilah Azalia**

Ukuran :

**xii, 184 hlm, Uk: 15.5x23 cm**

ISBN :

**978-623-02-7563-0**

Cetakan Pertama :

**November 2023**

Hak Cipta 2023, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2023 by Deepublish Publisher**

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH  
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: [www.deepublish.co.id](http://www.deepublish.co.id)

[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)

E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

## KATA PENGANTAR

---

Segala puji kami haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan segala anugerah dan karunia-Nya. Dalam rangka mencerdaskan dan memuliakan umat manusia dengan penyediaan serta pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menciptakan industri *processing* berbasis sumber daya alam (SDA) Indonesia, Penerbit Deepublish dengan bangga menerbitkan buku dengan judul ***TEKNOLOGI AMELIORASI TANAH MINERAL MASAM SECARA BERKELANJUTAN***.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada tim penulis yang telah memberikan kepercayaan, perhatian, dan kontribusi penuh demi kesempurnaan buku ini. Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pembaca, mampu berkontribusi dalam mencerdaskan dan memuliakan umat manusia, serta mengoptimalkan pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi di tanah air.

Hormat Kami,

**Penerbit Deepublish**

# DAFTAR ISI

---

<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>BAB 1 INTRODUKSI.....</b>	<b>1</b>
<b>BAB II POTENSI TANAH MINERAL MASAM DI INDONESIA.....</b>	<b>4</b>
2.1. Inceptisol.....	7
2.2. Ultisol .....	10
2.3. Oxisol.....	14
<b>BAB III PROSES PEMBENTUKAN TANAH MINERAL MASAM.....</b>	<b>17</b>
3.1. Geologi .....	19
3.2. Topografi .....	20
3.3. Vegetasi .....	22
3.4. Curah Hujan.....	23
<b>BAB IV SUMBER KEMASAMAN TANAH.....</b>	<b>24</b>
<b>BAB V KARAKTERISTIK FISIKO-KIMIA DAN BIOLOGI TANAH MINERAL MASAM .....</b>	<b>29</b>
5.1. Karakteristik Fisika.....	29
5.2. Karakteristik Kimia.....	31
5.3. Karakteristik Biologi.....	33
5.3.1. Sikaduduk .....	34
5.3.2. Paku-pakuan .....	35
5.3.3. Alang-alang .....	36

<b>BAB VI KENDALA PENGELOLAAN TANAH MINERAL</b>	
<b>MASAM .....</b>	<b>39</b>
6.1. Kesuburan Tanah Rendah.....	39
6.2. Peka terhadap Erosi sehingga Produktivitasnya Rendah.....	40
6.3. Menghambat Perkecambahan Biji, Peresapan Air Infiltrasi, Difusi O <sub>2</sub> ke dalam dan CO <sub>2</sub> dari Dalam Tanah .....	40
DAFTAR PUSTAKA .....	42
<b>BAB VII TEKNOLOGI AMELIORASI TANAH MINERAL</b>	
<b>MASAM DENGAN BAHAN ORGANIK .....</b>	<b>47</b>
7.1. Pupuk Hijau .....	48
7.1.1. Sumber Pupuk Hijau .....	48
7.1.2. Karakteristik Pupuk Hijau .....	56
7.1.3. Peranan dan Aplikasi Pupuk Hijau.....	58
7.2. Pupuk Kandang .....	70
7.2.1. Sumber dan Karakteristik Pupuk Kandang .....	70
7.2.2. Aplikasi Pupuk Kandang.....	73
7.3. Kompos .....	81
7.3.1. Sumber Kompos dan Proses Pengomposan .....	81
7.3.2. Karakteristik dan Faktor yang Memengaruhi Pengomposan .....	84
7.3.3. Aplikasi Kompos.....	91
7.4. Batubara Muda (Sub-bituminus) .....	95
7.4.1. Proses Pembentukan Batubara Muda .....	95
7.4.2. Karakteristik Batubara Muda .....	98
7.4.3. Aplikasi Batubara Muda.....	101
7.5. Bahan Organik Terhumifikasi .....	105
7.5.1. Proses Pembentukan Humus .....	106
7.5.2. Karakteristik Bahan Organik Terhumifikasi .....	111
7.5.3. Aplikasi Bahan Organik Terhumifikasi .....	112
7.6. Biochar .....	113
7.6.1. Sumber dan Produksi Biochar.....	113
7.6.2. Aplikasi Biochar.....	115
DAFTAR PUSTAKA .....	123

<b>BAB VIII</b>	<b>TEKNOLOGI AMELIORASI TANAH MINERAL MASAM DENGAN BAHAN ANORGANIK .....</b>	<b>135</b>
8.1.	Kapur .....	135
8.1.1.	Produksi Batu Kapur .....	136
8.1.2.	Karakteristik Fisiko-Kimia Batu Kapur .....	145
8.1.3.	Aplikasi Kapur dalam Bidang Pertanian .....	152
8.2.	Limbah Pembakaran PLTU ( <i>Fly and Bottom Ash</i> ).....	159
8.2.1.	Produksi Fly and Bottom Ash .....	159
8.2.2.	Fisiko-Kimia Fly and Bottom Ash .....	159
8.2.3.	Aplikasi <i>Fly and Bottom Ash</i> dalam Bidang Pertanian .....	161
	DAFTAR PUSTAKA .....	164
<b>BAB IX</b>	<b>PRODUKTIVITAS TANAH MINERAL MASAM.....</b>	<b>169</b>
9.1.	Kedelai .....	170
9.2.	Jagung .....	172
9.3.	Padi Gogo .....	174
9.4.	Kopi .....	176
	DAFTAR PUSTAKA .....	178
	<b>GLOSARIUM .....</b>	<b>181</b>

## DAFTAR TABEL

---

Tabel 2.1	Luasan lahan kering masam berdasarkan elevasi dan iklim pada beberapa pulau besar di Indonesia .....	5
Tabel 5.1	Karakteristik kimia tanah mineral masam .....	31
Tabel 7.1	Beberapa tanaman yang dapat digunakan sebagai pupuk hijau .....	53
Tabel 7.2	Karakteristik dari beberapa pupuk hijau .....	57
Tabel 7.3	Persentase N yang ditambat dari udara setiap pemangkasan.....	60
Tabel 7.4	Jumlah (mg/pot) penambatan N dari udara beberapa jenis tanaman setiap pemangkasan .....	61
Tabel 7.5	Sifat kimia Ultisol yang dipengaruhi efek sisa tithonia dan pupuk 2 musim tanam serta tambahan tithonia dan kapur sebelum musim tanam III.....	63
Tabel 7.6	Efek jangka panjang dari rotasi pupuk hijau pada pH tanah, bahan organik tanah dan P total pada tanah sawah masam .....	64
Tabel 7.7	Beberapa kandungan hara dalam bahan segar pupuk kandang .....	70
Tabel 7.8	Sifat kimia tanah setelah pemberian pupuk kandang pada Ultisol terdegradasi.....	75
Tabel 7.9	Pengaruh pemberian dosis berbeda dari kapur pertanian dan pupuk kandang ayam terhadap beberapa sifat tanah pada daerah Mukono.....	77
Tabel 7.10	Cara mengontrol rasio C:N selama pengomposan.....	85
Tabel 7.11	Cara mengontrol ukuran partikel selama pengomposan .....	86
Tabel 7.12	Cara mengontrol kelembapan selama pengomposan .....	88
Tabel 7.13	Cara mengontrol suhu selama pengomposan.....	89
Tabel 7.14	Cara mengontrol pH selama pengomposan .....	90

Tabel 7.15	Pengaruh pemberian kompos sagu terhadap sifat fisik tanah .....	92
Tabel 7.16	Sifat kimia tanah setelah lima bulan pengaplikasian kompos nenas .....	93
Tabel 7.17	Karakteristik Sub-bituminus .....	100
Tabel 7.18	Sifat Kimia Ultisol setelah pemberian formulasi subituminus dan biochar.....	102
Tabel 7.19	Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap pH H <sub>2</sub> O dan Kandungan Al-dd Ultisol .....	116
Tabel 7.20	Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap K-dd, Ca-dd dan Mg-dd Ultisol .....	120
Tabel 8.1	Kisaran elemen pengotor dalam batu kapur komersial (Sandström <i>et al.</i> , 2021) .....	150
Tabel 8.2	Beberapa sifat fisik dari batu kapur tohor (CaO) pada tingkat pembakaran yang berbeda.....	153
Tabel 8.3	Karakteristik kimia dari berbagai jenis kapur (Maulana, 2020) .....	155
Tabel 8.4	Komposisi kimia FABA berdasarkan jenis batubara .....	160
Tabel 9.1	Produktivitas kopi pada beberapa kepulauan besar di Indonesia .....	176
Tabel 9.2	Produktivitas lahan yang ditanami kopi di kebun Kalisat Jampit (2013-2017).....	176

## DAFTAR GAMBAR

---

Gambar 2.1	Penampang Inceptisol setiap lapisan untuk beberapa kedalaman di Kecamatan Banuhampu, Kabupaten Agam.....	8
Gambar 2.2	Penampang Ultisol di kebun percobaan Unand, Padang.....	11
Gambar 2.3	(a) Bentang alam (b) penampang Oxisol pada lahan di Padang Siantah .....	15
Gambar 3.1	Proses pembentukan tanah melalui pelapukan .....	18
Gambar 5.1	<i>Melastoma malabathricum</i> . (a) ranting dengan daun, (b) bunga, dan (c) buah yang sudah tua pecah.....	34
Gambar 5.2	<i>Gleichenia linearis</i> .....	36
Gambar 5.3	Alang-alang.....	37
Gambar 7.1	Beberapa tanaman yang dapat dijadikan sebagai pupuk hijau .....	52
Gambar 7.2	(a) <i>Sesbania rostrata</i> dan (b) <i>Tithonia diversolia</i> Juga Dapat Dijadikan Pupuk Hijau.....	55
Gambar 7.3	Pengaplikasian pupuk hijau tithonia pada tanah.....	59
Gambar 7.4	Efek jangka panjang dari rotasi pupuk hijau yang berbeda terhadap <i>stock</i> dari C-Organik Tanah (A) N-Total (B) dan P-total pada Tanah Sawah Masam .....	66
Gambar 7.5	Pengaruh jangka panjang dari rotasi pupuk hijau pada N tersedia tanah dan P tersedia tanah setelah padi awal (A,C) dan akhir (B,D).....	67
Gambar 7.6	Efek jangka panjang dari rotasi pupuk hijau yang berbeda terhadap keseimbangan (A) N dan P (B) tahunan pada tanah sawah masam .....	68
Gambar 7.7	SEM dari pupuk kandang babi (a), ayam (b) dan sapi (c) dengan perbesaran 10.00kV ((Sumber: Xu <i>et al.</i> , 2022) .....	72

Gambar 7.8	SEM (A), XRD (B), dan FTIR(C) dari pupuk kandang sapi (Cai <i>et al.</i> , 2019).....	73
Gambar 7.9	Fase pengomposan (Fischer <i>and</i> Glaser, 2012) .....	82
Gambar 7.10	Batubara muda saat masih ditanah (A) dan saat telah diambil (B) .....	95
Gambar 7.11	Proses pembentukan batubara .....	97
Gambar 7.12	Morfologi batubara Sub-bituminus (A) dan bubuk batubara Sub-bituminus (B) .....	99
Gambar 7.13	Pengaruh subituminus yang diaktivasi dengan dolomit pada (a) pH dan Aldd; (b) P-tersedia; (c)C-Organik; (d) N-total; (e) KTK dan (f) Kation Basa pada Ultisol (Herviyanti <i>et al.</i> , 2021).....	104
Gambar 7.14	Mekanisme pembentukan bahan humat (Stevenson 1982 dalam Ouni <i>et al.</i> , 2014). (1) <i>theory of Lignin</i> , (2, 3) <i>theory of polyphenols and</i> (4) <i>theory of amino-saccharidic condensation</i> .....	107
Gambar 7.15	Komposisi unsur zat humat (A: asam humat, B: asam fulvat).....	109
Gambar 7.16	Karakteristik kimia dari bahan humat .....	111
Gambar 7.17	Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap P-tersedia Ultisol.....	117
Gambar 7.18	Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap C-organik Ultisol .....	118
Gambar 7.19	Pengaruh aplikasi biochar dengan beberapa metode pirolisis terhadap KTK Ultisol .....	119
Gambar 8.1	Visualisasi dari beberapa jenis kapur: CaO (A); Ca(OH) <sub>2</sub> (B); CaCO <sub>3</sub> (C) dan CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (D).....	154
Gambar 8.2	Ion kompleks dalam proses hidrolisis pada permukaan kapur.....	157

# BAB 1

---

## INTRODUKSI

**Teknologi Ameliorasi Tanah Mineral Masam Secara Berkelanjutan** merupakan tulisan yang mengangkat pemanfaatan tanah mineral masam untuk usaha pertanian dan perkebunan dalam rangka mewujudkan pertanian berwawasan lingkungan. Indonesia mempunyai potensi tanah mineral masam yang sangat besar untuk pengembangan pembangunan pertanian saat ini dan masa yang akan datang. Tanah mineral masam yang ketersediaannya sangat luas merupakan aset bangsa yang perlu mendapat perhatian serius dari berbagai pihak terutama ahli pertanian dan masyarakat yang bergerak di bidang pertanian dan perkebunan. Total luasan tanah mineral masam khususnya lahan kering mencakup areal sekitar  $\pm 107,36$  juta ha (74,31% dari luas daratan Indonesia) yang tersebar di Pulau Kalimantan, Sumatra, dan Papua.

Beberapa ordo tanah mineral yang dikategorikan masam menurut *Soil Taxonomy* yaitu Inceptisol, Ultisol, Oxisol, Entisol, dan Spodosol (Soil Survey Staff, 2010) dan didominasi oleh Inceptisol, Ultisol dan Oxisol. Tanah-tanah mineral masam pada lahan kering di Indonesia yang umumnya termasuk ordo Ultisol (45,09 juta ha), Oxisol (14,20 juta ha) dan Inceptisol (40,27 juta ha) seperti diuraikan pada BAB II. Potensi ini memberikan latar bahwa pengembangan pertanian pada tanah mineral masam merupakan tantangan sekaligus peluang yang paling memungkinkan untuk meningkatkan ketahanan pangan menuju kedaulatan pangan di Indonesia.

Beberapa wilayah agroekosistem yang dikembangkan pada tanah mineral masam selama ini telah berhasil menjadi pusat pertumbuhan ekonomi wilayah sekitar, tetapi ada juga yang harus menunggu setengah generasi untuk menciptakan pertumbuhannya. Ada pula dalam catatan pengelolaan sumber daya lahan selama ini yang keliru sehingga tercipta suatu kawasan yang kehilangan ragam potensinya, sehingga potensi tanah

mineral masam tersebut tumbuh menuju kekritisian. Peningkatan permintaan akan bahan pangan dan industri berbahan baku hasil pertanian serta peluang substitusi energi dari karbon fosil ke bioenergi, tanah-tanah mineral masam yang marginal merupakan wilayah masa depan untuk pengembangan agroekosistem.

Tanah mineral masam umumnya berkembang dari bahan induk tua dan mempunyai kendala kemasaman tanah yang berhubungan dengan pH tanah  $<5,5$ , tingginya aluminium yang dapat ditukar (Al-dd) dalam tanah, terjadinya kekahatan unsur terutama fosfor (P) dan kalsium (Ca), serta keracunan besi (Fe) dan mangan (Mn) (Erfandi dan Nursyamsi, 1996). Mineral yang dominan ditemukan pada tanah mineral masam (Ultisol dan Oxisol) adalah mineral kaolinit, oksida besi dan aluminium, serta kandungan Al yang semakin meningkat pada lapisan tanah bawah (Hairiah *et al.*, 2000). Tanah-tanah di Indonesia sebagian besar berkembang pada iklim tropika basah dengan curah hujan  $>200$  mm/bulan dan didukung pula oleh temperatur yang tinggi sehingga proses pelapukan berjalan lebih cepat bila dibandingkan dengan daerah-daerah beriklim kering. Beberapa faktor penentu dalam pembentukan tanah mineral masam seperti geologi, topografi, vegetasi, dan curah hujan akan diuraikan secara lengkap pada bab III.

Bab IV menjabarkan tentang sumber kemasaman tanah berasal dari sejumlah proses seperti curah hujan dan respirasi akar, pemberian pupuk buatan, oksidasi sulfur dan oksidasi pirit, dekomposisi bahan organik, dan hidrolisis aluminium. Sementara karakteristik fisiko kimia dan biologi tanah mineral masam secara umum dijelaskan pada bab V.

Pengembangan tanah mineral masam menjadi lahan pertanian dan perkebunan dihadapkan pada kendala inheren dan kendala pengelolaan. Kendala-kendala inheren dan pengelolaannya merupakan materi akan dibahas lebih lanjut dalam tulisan ini. Pengelolaan kesuburan kimia tanah untuk meningkatkan produksi yang berkelanjutan pada tanah mineral masam adalah terlebih dahulu harus mengidentifikasi persoalan faktor pembatas kimia yang dapat menyebabkan defisiensi hara dan tingkat toksisitas unsur terhadap pertumbuhan tanaman bab VI.

Beberapa langkah strategis dalam pemanfaatan tanah mineral masam telah dilakukan oleh peneliti dan pengambil kebijakan

(pemerintah), salah satu di antaranya adalah teknologi ameliorasi tanah mineral masam dengan berbagai jenis bahan organik dan anorganik. Ameliorasi merupakan bahan-bahan yang ditambahkan ke dalam tanah untuk memperbaiki kondisi fisika, kimia, dan biologi tanah di lingkungan akar agar mendukung pertumbuhan tanaman. Bab VII membahas tentang beberapa jenis bahan organik seperti pupuk hijau, pupuk kandang, kompos sebagai sumber bahan amelioran tanah dan telah diaplikasikan dalam rangka mengikat logam seperti Al, Fe dan Mn yang banyak ditemukan pada tanah mineral masam. Di samping itu telah dimanfaatkan pula berbagai jenis bahan yang terhumifikasi seperti bubuk batubara muda dan bahan organik hasil dekomposisi termal seperti biochar yang dapat mengatasi kendala rendahnya pH tanah dan keracunan logam, serta meningkatkan ketersediaan P Tanah. Bahan tersebut relatif stabil atau sulit terdekomposisi di dalam tanah karena memiliki rantai aromatik yang panjang, sehingga dapat bertahan lama di dalam tanah dan efisien dalam penggunaannya. Teknologi Ameliorasi Tanah Mineral Masam dengan bahan anorganik. Seperti kapur dan abu terbang (*fly ash*) juga telah dimanfaatkan sebagai bahan amelioran dalam rangka mengatasi kendala tanah mineral masam (bab VIII).

Pada bagian akhir tulisan ini diungkapkan sejauh mana kontribusi tanah mineral masam dalam menghasilkan berbagai jenis tanaman baik pangan seperti padi, jagung dan kedelai, hortikultura, obat-obatan, tanaman industri dan perkebunan seperti kopi. Melalui teknologi ameliorasi tanah mineral masam dengan bahan organik dan anorganik baik yang berasal dari sumber daya lokal, limbah pertanian dan perkebunan, maupun limbah industri, maka suplai bahan amelioran akan tersedia secara kontinyu. Penggunaan bahan organik dan anorganik sebagai amelioran, merupakan salah satu tindakan konservatif untuk menggunakan tanah sesuai dengan kemampuannya dengan mempertimbangkan faktor-faktor pembatas agar tidak terjadi degradasi tanah dalam rangka menjaga produktivitasnya. Di samping itu, pengelolaan tanah secara tepat menjadi penting untuk menjaga lingkungan dan kelestarian tanah dalam rangka meningkatkan produktivitas tanah mineral masam secara berkelanjutan.

## BAB II

---

# POTENSI TANAH MINERAL MASAM DI INDONESIA

Potensi tanah mencakup luasan dan jenisnya untuk penggunaan tertentu. Indonesia mempunyai potensi tanah yang sangat besar mengingat luasan daratan Indonesia yang bisa dimanfaatkan khususnya untuk bidang pertanian dan perkebunan. Lahan daratan Indonesia mencakup luasan ±191,09 juta ha, terdiri atas lahan kering seluas ±144,47 juta ha, lahan rawa seluas ±34,12 juta ha, lahan basah non-rawa seluas ±9,44 juta ha, dan sisanya permukiman/perkotaan, areal pertambangan dan tubuh air (waduk, danau, sungai) (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2015).

Berdasarkan tingkat kemasaman, lahan kering yang tergolong masam (pH <5,5) mencakup areal sekitar ±107,36 juta ha (74,31%), dan yang tidak masam (pH >5,5) sekitar ±37,12 juta ha. Pulau Kalimantan, Sumatra, dan Papua sebagian besar merupakan lahan kering tergolong masam, sedangkan Sulawesi, Nusa Tenggara dan Maluku didominasi oleh lahan kering tidak masam (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2015). Lahan kering masam yang terbentuk dari hasil pelapukan mineral dari bahan induk batuan atau disebut juga tanah mineral masam menurut Subagyo *et al.* (2000) memiliki luasan terbesar di Indonesia yaitu ±67% dari total luas tanah Indonesia dan tersebar dari Pulau Sumatra sampai Papua. Lahan kering masam juga dikelompokkan berdasarkan elevasi dan iklim pada beberapa pulau besar di Indonesia. Luasannya disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Luasan lahan kering masam berdasarkan elevasi dan iklim pada beberapa pulau besar di Indonesia

Pulau	Dataran Rendah (ha)		Dataran Tinggi (ha)	
	Iklim Basah	Iklim Kering	Iklim Basah	Iklim Kering
Sumatra	21.430.119	153.353	9.351.318	0
Jawa	4.839.397	632.996	2.454.816	413.318
Bali dan Nusa Tenggara	72.257	55.347	10.647	30.541
Kalimantan	37.534.676	0	1.559.637	0
Sulawesi	3.434.626	139.593	3.752.757	139.503
Maluku	1.546.756	0	452.645	0
Papua	11.441.158	1.179.055	6.733.118	0
<b>Indonesia</b>	<b>80.298.989</b>	<b>2.160.343</b>	<b>24.314.938</b>	<b>583.362</b>

Keterangan:

Dataran rendah : Elevasi < 700 mdpl

Dataran tinggi : Elevasi  $\geq$  700 mdpl

Iklim basah : Curah hujan  $\geq$  2000 mm/tahun; rejim kelembapan tanah udik (lembap), akuik (basah)

Iklim kering : Curah hujan <2000 mm/tahun; rejim kelembapan tanah ustik (kering)

Besarnya luasan lahan tersebut bukan berarti secara keseluruhan bisa dimanfaatkan untuk lahan budidaya. Perlu dikaji dan dikelompokkan terlebih dahulu kesesuaian lahannya untuk setiap tipe tanaman. Ketentuan kesesuaian lahan ditentukan berdasarkan perpaduan kebutuhan tanaman atau persyaratan tumbuh tanaman dengan karakteristik lahan seperti kesuburan tanah, kelerengan, ketersediaan air pada lahan dan sebagainya.

Mulyani *et al.* (2003) menjelaskan bahwa terdapat lahan-lahan yang sesuai untuk kawasan budidaya tanaman pangan yang diperkirakan mencapai 18,2 juta ha yang terletak pada kemiringan <15%. Lahan kering masam yang sesuai untuk tanaman pangan semusim di dataran rendah (palawija, sayuran dan buah-buahan semusim) seluas 18,3 juta/ha, terluas terdapat di Kalimantan, Sumatra, dan Papua. Sedangkan lahan kering masam yang sesuai untuk tanaman tahunan seluas 33,6 juta ha, terluas terdapat di Sumatra, Kalimantan, dan Papua. Lahan yang sesuai tersebut dominan terdapat di kawasan yang beriklim basah, sedangkan kawasan yang sesuai di lahan kering dataran rendah iklim kering hanya sedikit yaitu

182.902 ha untuk tanaman pangan dan 671.736 ha untuk tanaman tahunan, terluas terdapat di NTT, Sulawesi, Maluku, dan Papua. Untuk kawasan yang berada di dataran tinggi (>700 mdpl), sebagian besar beriklim basah yaitu 1 juta ha sesuai untuk tanaman pangan dan 2 juta ha sesuai untuk tanaman tahunan. Sedangkan kawasan yang berada di dataran tinggi beriklim kering, hanya sesuai untuk tanaman tahunan, yaitu 60.752 ha.

Lahan yang tidak sesuai seluas sekitar 46,8 juta ha umumnya karena faktor pembatas lereng (> 30-40%), solum dangkal dan banyaknya batuan di permukaan. Dari lahan yang tidak sesuai, ± 31,2 juta ha merupakan daerah bergunung dengan lereng >30% (Mulyani *et al.*, 2004). Pada wilayah bergunung ini banyak dijumpai tanah-tanah yang bersolum dangkal dan kandungan batuan di permukaan >50%. Lahan-lahan tersebut diarahkan untuk kawasan hutan, meskipun kenyataannya di lapangan sebagian ada yang tetap diusahakan untuk usaha pertanian (termasuk usaha tani tanaman pangan), yang umumnya tanpa menerapkan teknologi konservasi tanah dan air, sehingga lahan tersebut umumnya sudah terdegradasi.

Luasan lahan kering di Indonesia sangat berpotensi untuk pengembangan kawasan pertanian termasuk lahan kering yang bersifat masam. Beberapa luasan lahan dinilai sangat potensial sedangkan beberapa luasan lainnya tidak potensial untuk pertanian dan dapat dialihkan untuk tata guna lahan lainnya. Menurut Heryani dan Popi (2019), dari luas lahan kering di Indonesia yang mencapai 144,47 juta ha, sekitar 99,65 juta ha (68,98%) merupakan lahan potensial untuk pertanian, sedangkan sisanya sekitar ± 44,82 juta ha tidak potensial untuk pertanian yang sebagian besar terdapat di kawasan hutan.

Sebagian besar lahan daratan Indonesia termasuk pada lahan masam, yang sebagian telah dimanfaatkan untuk memproduksi berbagai jenis komoditas pertanian, baik tanaman pangan maupun tanaman tahunan (perkebunan dan hortikultura). Berdasarkan hasil analisis potensi lahan, sekitar 29,39 juta ha (29,50%) potensial untuk tanaman pangan lahan kering, sekitar 1,12 juta ha (1,13%) potensial untuk tanaman sayuran dataran tinggi, sekitar 66,72 juta ha (66,95%) potensial untuk tanaman tahunan termasuk buah-buahan, dan sekitar 2,42 juta ha (2,43%) potensial untuk pengembalaan ternak. Lahan kering potensial terluas terdapat di

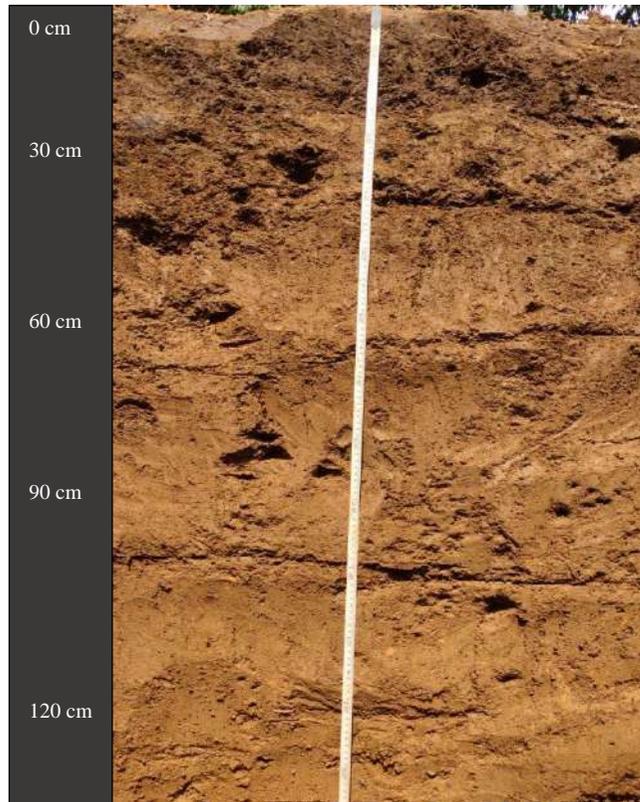
Pulau Kalimantan seluas 30,48 juta ha, disusul Sumatra sekitar 28,56 juta ha, Papua 13,35 juta ha, Sulawesi 9,12 juta ha, Jawa 8,79 juta ha, Maluku 5,08 juta ha dan Bali & Nusa Tenggara seluas 4,29 juta ha (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2015).

Tanah masam mempunyai karakteristik tertentu yang bisa diamati dari sifat fisiknya terutama warna tanahnya sebelum dilakukan uji sifat kimianya. Tanah masam dapat berupa tanah mineral masam dan tanah organik masam (gambut). Tanah mineral masam umumnya dijumpai pada tanah-tanah merah yang telah mengalami pelapukan lanjut, sedangkan tanah organik masam umumnya tersebar pada tanah-tanah di dataran rendah, cekungan atau rawa (Yulianti, 2007).

Total luasan tanah mineral masam tersebut terdiri dari beberapa ordo tanah yang dibedakan berdasarkan sifat kimia, fisika dan biologi tanahnya. Beberapa ordo tanah mineral yang dikategorikan masam berdasarkan *Soil Taxonomy* yaitu Inceptisol, Ultisol, Oxisol, Entisol, dan Spodosol (Soil Survey Staff, 2010). Tanah mineral masam didominasi oleh Inceptisol, Ultisol dan Oxisol. Tanah-tanah mineral masam pada lahan kering total luasnya 99,56 juta ha di Indonesia yang umumnya termasuk ordo Ultisol (45,09 juta ha), Oxisol (14,20 juta ha) dan Inceptisol (40,27 juta ha) (Hidayat dan Mulyani 2005).

## **2.1. Inceptisol**

Inceptisol merupakan jenis tanah yang potensial untuk dikembangkan dengan luas mencapai 52 juta ha secara nasional (Kasno, 2009). Menurut Soil Survey Staff (2010), Inceptisol adalah tanah-tanah dari daerah dingin atau sangat panas, lembap, sublembap dan yang mempunyai horizon kambik dan epipedon okrik. Permasalahan yang timbul pada Inceptisol adalah kesuburan tanah yang rendah, yaitu dengan tanah bereaksi masam sampai agak masam dengan nilai pH berkisar antara 4,5-6,5 (Resman *et al.*, 2006). Secara fisik, Inceptisol terlihat seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Penampang Inceptisol setiap lapisan untuk beberapa kedalaman di Kecamatan Banuhampu, Kabupaten Agam.

Keterangan:

Lapisan	Kedalaman	Warna	Tekstur	Struktur	Perakaran	Karatan
1	0-30 cm	10 YR 4/3	Lempung Liat Berpasir	Gumpal Bersudut	Banyak	-
2	30-47 cm	10 YR 5/4	Lempung Liat Berpasir	Gumpal Bersudut	Sedang	-
3	47-71 cm	10 YR 5/6	Lempung liat berpasir	Gumpal Bersudut	-	-
4	71-108 cm	10 YR 5/6	Lempung liat berpasir	Gumpal Bersudut	-	-

Lapisan	Kedalaman	Warna	Tekstur	Struktur	Perakaran	Karatan
5	108-141	10 YR 5/6	Lempung liat berpasir	Gumpal Bersudut		
6	141-158 cm	10 YR 5/8	Pasir	Gumpal Bersudut	-	-

Sifat fisik dan kimia tanah Inceptisol antara lain; berat volume 1,0 g/cm<sup>3</sup>, kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) kurang dari 40%, kejenuhan basa (KB) kurang dari 50% pada kedalaman 1,8 m, nilai porositas (TRP) 68% sampai 85%, air yang tersedia cukup banyak dengan daya pegang sebesar 0,1-1 atm (Resman *et al.*, 2006 *cit* Ketaren *et al.*, 2014). Karakteristik Inceptisol memiliki solum tanah agak tebal yaitu 1-2 meter, warna hitam atau kelabu sampai dengan coklat tua, tekstur pasir, debu, dan lempung, struktur tanah remah konsistensi gembur, pH 5-7, bahan organik cukup tinggi (10% sampai 31%), kandungan unsur hara yang sedang sampai tinggi, produktivitas tanahnya sedang sampai tinggi (Nuryani *et al.*, 2003 *cit* Ketaren *et al.*, 2014).

Menurut Nursyamsi dan Suprihati (2005), kandungan C-organik (1,5%) dan nitrogen total (0,13%) pada Inceptisol lebih rendah jika dibandingkan dengan Oxisol (C-organik = 2,19% dan N-total = 0,19%), Vertisol (C-organik = 1,67% dan N-total = 0,17%), dan Andisol (C-organik = 7,28% dan N-total = 0,39%). Inceptisol selain kemasaman tanahnya tergolong agak masam, kandungan basa yang dipertukarkan seperti Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> dan kejenuhan basa juga termasuk rendah, selain itu kadar fosfor tersedia rendah.

Inceptisol adalah tanah tergolong relatif muda, dicirikan oleh adanya horizon kambik, yaitu suatu horizon alterasi atau perubahan pada tahap awal yang dicirikan oleh perkembangan struktur atau perubahan warna tanah, transformasi secara kimia atau pemindahan bahan, dan atau merupakan hasil kombinasi dari dua atau lebih proses tersebut (Soil Survey Staff, 2006). Menurut Apriani *et al.*, (2019) berdasarkan penelitian jenis mineral yang mendominasi pada Inceptisol di Aceh Besar yaitu, bervariasi antar lapisan horizon, akan tetapi komposisi jenis mineralnya terdiri atas campuran mineral primer (felspar) dan mineral sekunder (kaolinit, paligorskit, dan gipsit). Kemudian, ordo Inceptisol tergolong

berkualitas rendah dengan komposisi mineral liat tipe 1:1 dan oksida Fe dan Al yang cenderung memiliki liat beraktivitas rendah. Inceptisol tersebut termasuk tanah bertekstur sedang, bereaksi masam mempunyai KTK yang rendah hingga tinggi tergantung jenis mineral dan kandungan bahan organik yang terkandung di dalamnya.

## **2.2. Ultisol**

Ultisol merupakan salah satu jenis tanah di Indonesia yang mempunyai sebaran luas mencapai 45.794.000 ha atau sekitar 25% dari total luas daratan Indonesia. Sebaran terluas terdapat di Kalimantan (21.938.000 ha), diikuti di Sumatra (9.469.000 ha), Maluku dan Papua (8.859.000 ha), Sulawesi (4.303.000 ha), Jawa (1.172.000 ha), dan Nusa Tenggara (53.000 ha). Tanah ini dapat dijumpai pada berbagai relief, mulai dari datar hingga bergunung (Prasetyo dan Suriadikarta, 2006).

Menurut Mulyani *et al.* (2004) sebagian besar sub-ordo tanah Ultisol di Sumatra terdiri atas Udults dan Aquults. Ultisol terbentuk dalam jangka waktu yang cukup lama bersamaan dengan suhu yang tinggi dan pencucian yang kuat. Akibatnya, terjadi pelapukan terhadap mineral mudah lapuk dan pembentukan liat sekunder dan oksida-oksida. Pencucian yang intensif terhadap basa-basa berjalan sangat lanjut dan menyebabkan kejenuhan basa rendah sampai di lapisan bawah tanah sehingga tanah bereaksi masam (Barchia, 2009).

Sumber kemasaman Ultisol berasal dari keberadaan Al pada tanah tersebut. Nilai kejenuhan Al yang tinggi terdapat pada tanah Ultisol dari bahan sedimen dan granit (> 60%), dan nilai yang rendah pada tanah Ultisol dari bahan volkan andesitik dan gamping (0%). Ultisol dari bahan tufa mempunyai kejenuhan Al yang rendah pada lapisan atas (5-8%), tetapi tinggi pada lapisan bawah (37-78%). Kejenuhan Al pada Ultisol berhubungan erat dengan pH tanah. Kejenuhan Al yang tinggi mengindikasikan rendahnya pH di dalam tanah sehingga tanah tersebut tergolong masam. Penampang Ultisol disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Penampang Ultisol di kebun percobaan Unand, Padang

Keterangan:

Lapisan	Kedalaman	Warna	Tekstur	Struktur	Perakaran	Karatan
1	0-31 cm	10 YR 4/2	Lempung Liat Berpasir	Gumpal Bersudut	Banyak	-
2	31-43 cm	10 YR	Lempung	Gumpal	Sedang	-

Lapisan	Kedalaman	Warna	Tekstur	Struktur	Perakaran	Karatan
		4/3	Liat Berpasir	Bersudut		
3	43-73 cm	10 YR 5/6	Lempung Berliat	Gumpal Bersudut	Sedikit	-
4	73-93 cm	10 YR 5/8	Lempung Berliat	Gumpal Bersudut	-	-
5	> 93 cm	10 YR 5/8	Lempung Berliat	Gumpal Bersudut	-	-

Ultisol selain memiliki masalah kemasaman tanah, Ultisol juga mempunyai kadar bahan organik rendah dan nutrisi makro rendah, ketersediaan P sangat rendah. Kemudian, kapasitas tukar kation (KTK), kejenuhan basa (KB) dan C-organik rendah, serta kandungan aluminium (kejenuhan Al) tinggi, fiksasi P tinggi, kandungan besi dan mangan mendekati batas meracuni tanaman, dan peka erosi. Tingginya curah hujan di sebagian wilayah Indonesia menyebabkan tingkat pencucian hara tinggi terutama basa-basa, sehingga basa-basa dalam tanah akan segera tercuci keluar lingkungan tanah dan yang tinggal dalam tanah menjadi bereaksi masam dengan kejenuhan basa rendah (Mulyani *et al.*, 2010).

Tanah Ultisol umumnya mempunyai nilai KB < 35%, karena batas ini merupakan salah satu syarat untuk klasifikasi tanah Ultisol menurut *Soil Taxonomy*. Beberapa jenis tanah Ultisol mempunyai KTK < 16 cmol/kg liat, yaitu Ultisol yang mempunyai horizon kandik. Reaksi tanah Ultisol pada umumnya masam hingga sangat masam (pH 5-3,10), kecuali tanah Ultisol dari batu gamping yang mempunyai reaksi netral hingga agak masam (pH 6,80-6,50). KTK pada tanah Ultisol dari granit, sedimen, dan tufa tergolong rendah masing-masing berkisar antara 2,90-7,50 cmol/kg, 6,11-13,68 cmol/kg, dan 6,10-6,80 cmol/kg, sedangkan yang dari bahan volkan andesit dan batu gamping tergolong tinggi (>17 cmol/kg). Hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa tanah Ultisol dari bahan volkan, tufa berkapur, dan batu gamping mempunyai KTK yang tinggi (Prasetyo *et al.*, 2000; Prasetyo *et al.*, 2005).

Sifat kimia Ultisol yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman di antaranya adalah pH tanah yang rendah (<5,0), kejenuhan Al yang tinggi (>42%), kandungan bahan organik yang rendah (< 1,15%), kandungan hara yang rendah yaitu unsur N ( $\pm$  0,14%), unsur P ( $\pm$  5,80

ppm), KB yang rendah dan KTK tanah yang juga rendah ( $\pm 12,6$  me/100 g) (Alibasyah, 2016).

Ultisol digolongkan pula tanah yang mengalami kemasaman di dalam tanah. Adapun reaksi tanah Ultisol pada umumnya masam hingga sangat masam (pH 3,10-5,5) tergantung dari bahan induknya, kecuali tanah Ultisol dari batu gamping yang memiliki reaksi netral hingga agak rendah (pH 6,80-6,50) Prasetyo & Suridiakarta (2006). Poerwowidodo (1991) juga menyatakan sebagian besar Ultisol mengandung banyak unsur Al yang dapat diekstrak dan sangat kahat K. Kondisi Ultisol yang jenuh unsur Al tersebut menyebabkan pH tanah rendah diakibatkan oleh hidrolisis Al yang menghasilkan ion  $H^+$  yang merupakan salah satu sumber kemasaman pada tanah. Dapat dilihat pada reaksi di bawah ini:



Tanah dapat menjadi masam karena masuknya ion  $H^+$  ke dalam tanah dan adanya ion Al, baik dalam bentuk dapat dipertukarkan (monerik) dan tidak dapat dipertukarkan (polimerik). Sumber kemasaman tanah juga berasal dari sejumlah proses seperti curah hujan dan respirasi, pemberian pupuk buatan, oksidasi sulfur dan oksidasi pirit, dekomposisi bahan organik, dan hidrolisis aluminium. Pada polimer Al dan Fe, ion  $Al^{3+}$  yang berpindah dari permukaan tukar kation dihidrolisis menjadi senyawa kompleks hidroksi aluminium. Reaksi hidrolisis ini berlangsung secara bertahap dan melepaskan ion  $H^+$  sehingga pH menjadi lebih rendah (Putri *et al.*, 2017).

Ultisol memiliki kandungan P potensial yang sangat rendah, sedangkan kandungan K potensialnya bervariasi dari sangat rendah hingga rendah (Tando, 2020). Podsolik Merah Kuning yang terbentuk dari batuan granit berupa mineral kuarsa memiliki karakter tekstur liat berpasir sedangkan tanah podsolik merah kuning yang terbentuk dari batu kapur, batu andesit dan tufa cenderung memiliki tekstur yang halus seperti liat dan liat halus. Tanah ini memiliki struktur yang memiliki karakter sedang hingga kuat dengan bentuk gumpal bersudut serta berat volume tanah yang cukup tinggi yaitu berkisar antara  $1,3-1,5$  g.cm<sup>-3</sup> dengan daya jerap yang rendah.

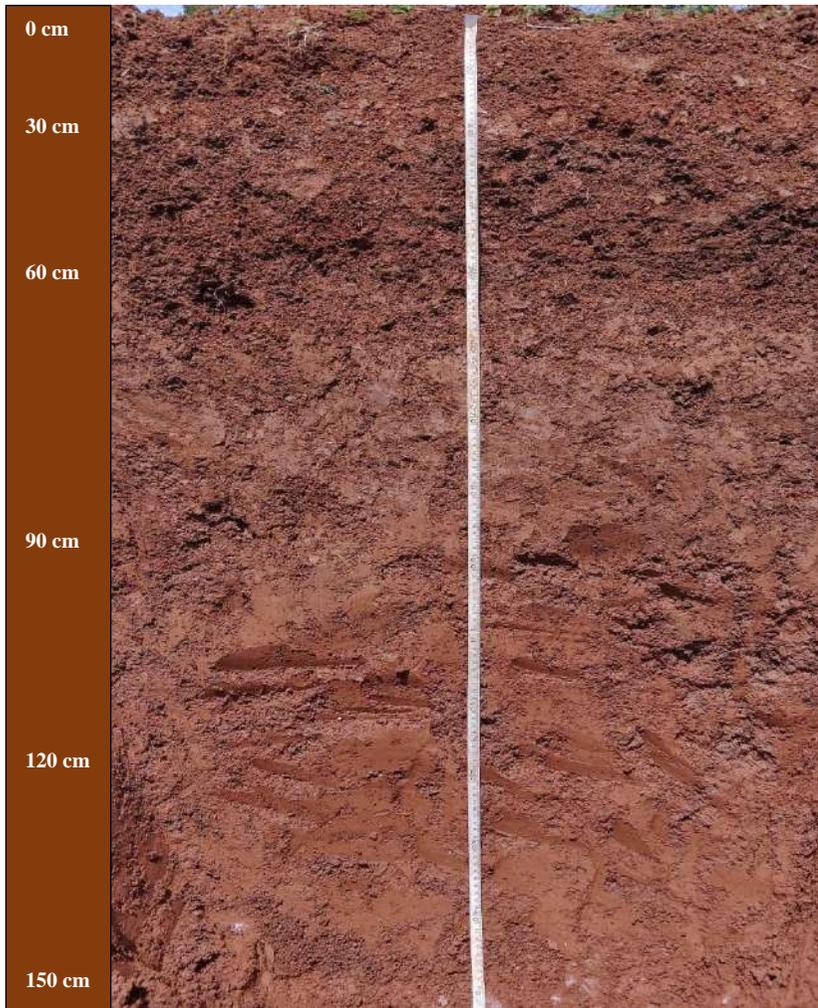
Tanah Ultisol merupakan tanah masam yang mempunyai horizon argilik sebagai hasil iluviasi liat dari lapisan di atasnya. Kandungan liat pada horizon argilik nyata lebih tinggi dibandingkan dari lapisan di atasnya. Di Kalimantan Selatan tanah ini berasal dari batuan granit dan sedimen didominasi oleh mineral liat kaolinit dan mineral pasir kuarsa dan opak (Anda *et al.*, 2000) yang menunjukkan bahwa tanah sudah mengalami pelapukan lanjut (Kasno, 2019). Dengan demikian, Tingkat kesuburan tanah Ultisol (Podsolik Merah Kuning) cukup rendah karena dinamika sifat fisika dan kimia tanah yang buruk sehingga dibutuhkan pengaplikasian bahan pembenah tanah (Abdillah dan Aldi, 2020).

### 2.3. Oxisol

Oxisol merupakan salah satu jenis tanah marginal yang telah mengalami pelapukan lanjut dan tua, mempunyai penyebaran yang luas yaitu  $\pm 9,8$  juta  $\text{Km}^2$  atau sekitar 7,5% dari luas permukaan bumi. Faktor pembatas yang dimiliki Oxisol di antaranya yaitu tingkat kesuburan alami yang tergolong rendah karena sedikitnya kandungan bahan organik, tingginya kelarutan mineral besi ( $\text{Fe}^{3+}$ ) dan Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ), pH relatif masam, terjadinya fiksasi P dan rendahnya KTK (Hardjowigeno, 2003). Bentuk lahan dengan jenis tanah Oxisol dapat dilihat pada Gambar 2.3.



(a)



(b)

Gambar 2.3 (a) Bentang alam (b) penampang Oxisol pada lahan di Padang Siantah

Keterangan:

Lapisan	Kedalaman	Warna	Tekstur	Struktur	Perakaran	Karatan
1	0-31 cm	5 YR 4/8	Liat	Gumpal Bersudut	Sedang	Ada
2	31-48 cm	5 YR 4/6	Liat	Gumpal Bersudut	Sedikit	Ada
3	48-59 cm	5 YR	Liat	Gumpal	Sedikit	Ada

Lapisan	Kedalaman	Warna	Tekstur	Struktur	Perakaran	Karatan
		4/4		Bersudut		
4	59-70 cm	5 YR 3/6	Liat	Gumpal Bersudut	-	-
5	70-80 cm	5 YR 3/4	Liat	Gumpal Bersudut	-	-
6	80-100 cm	5 YR 4/6	Liat	Gumpal Bersudut	-	-
7	>100 cm	5 YR 5/6	Liat	Gumpal Bersudut	-	-

Oxisols dari granodiorit bersifat masam, C-organik sedang sampai tinggi, kejenuhan Al tinggi, KTK tanah rendah, dan basa-basa dan P tersedia rendah, serta didominasi fraksi kuarsa (Yatno, 2010). Ketersediaan P pada Oxisol biasanya relatif rendah. Permasalahan ini disebabkan terikatnya P oleh koloid tanah bahkan penambahan P dalam bentuk pupuk pun sebagian besar diikat oleh koloid tanah, salah satunya adalah sesquioksida. Dengan demikian jelas bahwa yang dihadapi pada tanah jenis Oxisol jika dikelola sebagai lahan pertanian adalah keracunan logam berat terutama Al dan Fe serta kekurangan unsur hara esensial (Sanchez, 1992).

Oxisol termasuk tanah yang kurang subur dengan pembatas utama pertumbuhan dan hasil tanaman antara lain: kemasaman tanah dan kandungan Al tinggi, ketersediaan hara N, P dan K serta C-organik rendah dan mudah tererosi (Kasno, 2019). Tanah Oxisol di Sonay dan Sitiung, Jambi didominasi mineral liat kaolinit, KTK tanah rendah, KB rendah, dan kejenuhan Al tinggi (Anda *et al.*, 2001). Menurut Anda *et al.*, (2007) jenis mineral pada Oxisol didominasi oleh kaolinit, geotit, hematit, dan gipsit.

Dengan demikian, besarnya luasan tanah masam di Indonesia dengan beberapa jenis tanah sangat potensial untuk dikembangkan terutama untuk sektor pertanian. Namun, perlu adanya upaya dalam mengembalikan dan meningkatkan produktivitas lahan pada tanah masam tersebut. Sebagian lahan tanah masam belum dimanfaatkan oleh masyarakat tetapi sebagian lainnya telah termanfaatkan meskipun dengan kesuburan yang rendah.

### BAB III

---

## PROSES PEMBENTUKAN TANAH MINERAL MASAM

Tanah masam umumnya berkembang dari bahan induk tua dan mempunyai kendala kemasaman tanah yang berhubungan dengan pH tanah  $<5,5$ , tingginya aluminium yang dapat ditukar (Al-dd) dalam tanah, terjadinya kekahatan unsur fosfor dan kalsium, serta keracunan mangan (Erfandi dan Nursyamsi, 1996). Tanah masam (Ultisol dan Oxisols) merupakan tanah yang didominasi mineral-mineral kaolinit, oksida besi dan aluminium, serta kandungan Al yang semakin meningkat pada lapisan tanah bawah (Hairiah *et al.*, 2000).

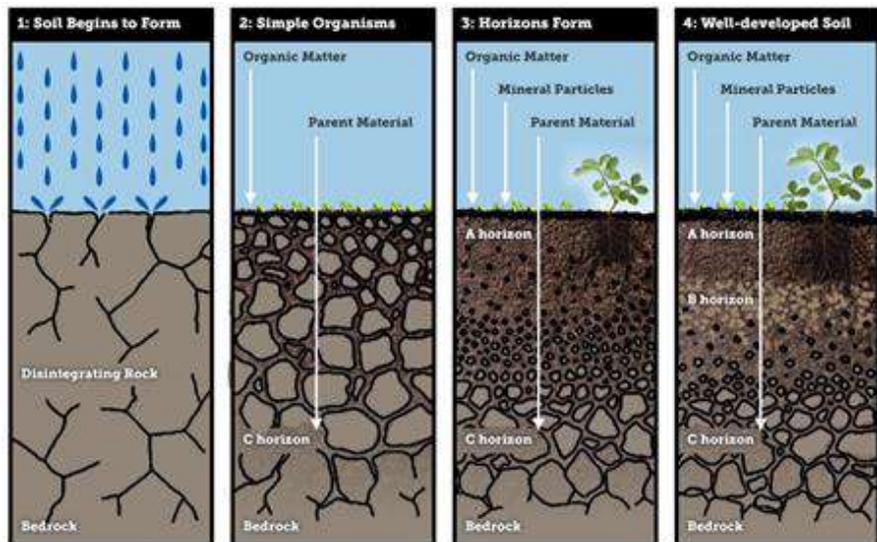
Tanah mineral masam marginal terbentuk pada wilayah tropika basah. Tanah-tanah di Indonesia sebagian besar berkembang pada iklim tropika basah dengan curah hujan  $>200$  mm/bulan dan karena didukung pula oleh temperatur yang tinggi maka proses pelapukan berjalan lebih cepat bila dibandingkan dengan daerah-daerah beriklim kering.

Pada kondisi curah hujan dengan intensitas tinggi peluang terjadinya erosi pada lahan kering menjadi semakin tinggi. Di samping itu energi kinetik hujan semakin meningkat, peluang erosi yang tinggi terjadi pula karena kesempatan air untuk intersepsi ke dalam tanah menjadi kecil, sehingga air yang menjadi aliran permukaan yang akan menggerus tanah juga semakin besar (Erfandi, 2013).

Proses pelapukan ini menghasilkan penciri-penciri spesifik sehingga memberikan nama tersendiri pada masing-masing jenis tanah mineral masam. Curah hujan yang tinggi menyebabkan proses pencucian yang intensif, sehingga kation-kation basa; Ca, Mg, K, dan Na hilang dari lapisan tanah, dan tanah memiliki kejenuhan basa yang rendah. Pencucian dari mineral liat pada lapisan atas menyebabkan terjadinya penumpukan mineral liat pada horizon di bawahnya sehingga terbentuk horizon argilik,

dengan jenis tanah yang terbentuk yaitu Ultisol. Lahan kering masam sebagian besar terbentuk dari bahan induk batuan sedimen masam termasuk metamorf dan tuf vulkan masam (andesit, liparit, dasit). Sedangkan lahan kering tidak masam umumnya terbentuk dari bahan induk batuan sedimen basis seperti batu gamping, napal, dan batuan vulkan basalt (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2015).

Ketika batuan induk mengalami pelapukan, batuan tersebut terpecah menjadi potongan-potongan kecil sehingga banyak pelapukan-pelapukan lainnya pada permukaan batuan yang memungkinkan partikel organik dengan ukuran yang sama berpasangan dengan batuan induk yang lapuk. Muncul partikel-partikel mineral sebagai hasil proses pelapukan. Adanya bahan organik menjadikan tumbuhan tumbuh subur. Tumbuhan melanjutkan proses pelapukan dan menambah bahan organik tanah. Proses ini untuk mematangkan tanah untuk lebih mendukung pertumbuhan lainnya pada tumbuhan sehingga siklus tetap berlanjut (Weatherstem, 2017). Proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Proses pembentukan tanah melalui pelapukan (Weatherstem, 2017)

Tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut akan didominasi oleh mineral-mineral bersifat *low activity clay* (liat beraktivitas rendah), yaitu mineral oksida Fe dan Al, sehingga kapasitas tukar kation pada tanah tersebut menjadi sangat rendah, dan sebaliknya pada tanah tersebut memiliki kapasitas fiksasi yang sangat kuat terhadap anion, tanah ini dinamai Oxisols. Pencucian tidak hanya terjadi pada mineral liat, tetapi pencucian dapat juga terjadi pada humus tanah, sehingga terbentuk horizon yang pucat di lapisan atas dan berwarna gelap di lapisan bawah, dan tanah ini disebut Spodosols. Tanah-tanah yang terbentuk dari bahan induk abu vulkan dan telah mengalami pencucian yang intensif akan ber-pH rendah dan mineral amorf akan mendominasi mineral oksidanya. Tanah yang terbentuk dari bahan induk abu vulkan bermineral oksida amorf ini antara lain Andisols dan Dystrandepts (Barchia, 2009).

### **3.1. Geologi**

Proses pelapukan bahan induk pada kondisi iklim basah dan suhu udara yang tinggi berjalan sangat intensif. Akibatnya tanah cepat berkembang dan membentuk tanah-tanah berlapukan tinggi. Terdapat tiga ordo tanah utama yang sebagian besar tergolong tanah masam yang potensial untuk pertanian, yaitu Inceptisols, Ultisols, dan Oxisols (Subagyo *et al.*, 2000) atau setara dengan Latosol, Podsolik Merah Kuning, dan Lateritik (Soepraptohardjo, 1961). Bila dikelola dengan baik, sangat berpeluang untuk pengembangan berbagai komoditas pertanian andalan dan akan memberikan sumbangan yang cukup besar terhadap penyediaan pangan nasional (Tim Badan Litbang Pertanian, 1998).

Bahan induk tanah mineral masam berasal dari granit yang kaya akan mineral kuarsa bertekstur kasar, sedangkan bahan induk batu kapur, batuan andesit, dan tufa bertekstur halus (Prasetyo *et al.*, 2005). Lahan kering masam terjadi pelapukan dan pencucian yang sangat intensif, fraksi pasir sukar lapuk didominasi kuarsa, fraksi liat kaolinit dan tanah bersifat masam serta kejenuhan basa rendah. Tanah kering masam umumnya berwarna kuning sampai merah dan telah mengalami pelapukan lanjut dengan kandungan fraksi pasir yang didominasi oleh kuarsa, dan opak, sedangkan fraksi liat didominasi oleh kaolinit, goetit, dan hematit, mempunyai liat aktivitas rendah, bersifat masam, kandungan hara rendah,

dan kejenuhan Al tinggi (Prasetyo dan Suharta 2004, Prasetyo 2009). Pada kondisi tanah dengan fraksi pasir kuarsa dan opak yang dominan menunjukkan bahwa tanah sudah miskin dan tidak ada lagi yang bisa dilapukan. Tanah dengan ciri-ciri berwarna merah menunjukkan kandungan Fe yang tinggi, pada kondisi kering Fe bervalensi 3 dan tidak dapat diserap oleh tanaman.

Ultisol dapat berkembang dari berbagai bahan induk, dari yang bersifat masam hingga basa. Namun sebagian besar bahan induk tanah ini adalah batuan sedimen masam. Menurut Munir (1996) Ultisol bahan induknya berasal dari tuf masam, batu pasir, serta bahan-bahan endapan dari pasir masam. Ultisol dari bahan sedimen mempunyai kesuburan alami yang lebih rendah daripada dari bahan vulkan atau batu kapur, karena bahan sedimen sudah merupakan hasil perombakan bahan lain sehingga kandungan unsur haranya pun rendah (Prasetyo dan Suriadikarta, 2006).

Oxisol berasal dari bahan induk ferromagnesian (mineral yang mengandung besi dan magnesium) yang mengandung mineral lempung golongan kaolin dan oksida logam dalam matriks bertekstur halus dengan sangat sedikit atau tidak ada silikat yang mudah lapuk (Britannica, 2012). Oxisol terbentuk dari bahan induk yang telah mengalami pelapukan lanjut atau mungkin dipindahkan ke tempat yang sekarang setelah mengalami pelapukan lanjut di tempat asalnya (Munir, 1996).

Inceptisol ada juga yang berasal dari bahan induk pasir kuarsa (Munir, 1996). Banyak juga dari Inceptisol yang berkembang dari bahan induk abu vulkan atau andisol yang mempunyai potensi untuk dikembangkan (Sarwono, 1985). Pada umumnya komposisi mineral dan sifat-sifat kimia dari tanah merah di daerah tropika basah relatif sama. Mineral pasir didominasi oleh kuarsa dan opak, sedangkan mineral liat didominasi oleh kaolinit dengan tambahan mineral gibsit, goetit dan hematit. Kadang-kadang dijumpai pula mineral smektit dalam jumlah sedikit (Bennema, 1967; Uehara dan Gillman, 1981; Subagyo *et al.*, 1986; Fauzi *et al.*, 1987).

### **3.2. Topografi**

Topografi memengaruhi proses pembentukan tanah meliputi jumlah air hujan yang meresap atau ditahan oleh tanah, memengaruhi besarnya

erosi serta mengarahkan bahan-bahan terlarut dari suatu tempat ke tempat lain. Kondisi tersebut berbeda untuk setiap ordo tanah karena hubungan kelerengannya tidak selalu dengan sifat-sifat tanah di semua tempat, seperti di bagian puncak, cembung, bagian cekung dan kaki lereng. Daerah yang berlereng, pencucian Fe dan Mn bersama air lebih cepat, sedangkan Al tertinggal karena Fe dan Mn lebih *mobile* daripada Al atau membentuk Oxisol yang kaya besi oksida (Munir, 1996).

Lokasi tanah masam berada pada iklim basah dengan curah hujan tinggi. memiliki sifat fisik tanah yang jelek, topografi berlereng, pencucian hara dan erosi tanah sangat intensif. Lahan kering masam terbentuk pada tanah berombak sampai bergelombang, dengan kemiringan datar sampai 8% atau bahkan bisa 40% masih diusahakan untuk tanaman pangan. Pada kondisi demikian penataan lahan berupa penataan saluran pembuangan air dan penggunaan teknik konservasi perlu dilakukan. Kesesuaian tanaman pangan pada kemiringan lahan berlereng curam harus dievaluasi, baik aspek produktivitas maupun aspek lingkungan. Seberapa besar erosi yang ditimbulkan akibat pemanfaatan lahan berlereng yang kurang tepat perlu dikaji (Kasno, 2019).

Dalam proses pembentukan tanah pelapukan secara kimia sangat intensif, sehingga basa-basa seperti Ca, Mg, K dan Na lebih cepat dibebaskan (Subagyo *et al.*, 2000). Pada saat curah hujan tinggi basa-basa tersebut tercuci dan tidak dapat digunakan oleh tanaman. Selain kendala kesuburan tanah, topografi juga menjadi kendala yang membuat tanah miskin akan unsur hara. Pengelolaan lahan tanpa kaidah konservasi tanah dapat menjadikan lahan yang memiliki topografi bergelombang atau berbukit mengalami erosi tanah dan aliran permukaan pada saat hujan. Tingginya erosi dan aliran permukaan pada tanah kering masam berkaitan dengan topografi yang umumnya berlereng dan didorong oleh daya pegang air rendah sehingga tanah cepat jenuh. Kapasitas tukar kation (KTK) pada tanah kering masam umumnya rendah karena nilai KTK hanya bergantung pada kandungan bahan organik yang rendah dan fraksi liat yang dalam hal ini didominasi oleh liat kaolinit dengan kontribusi terhadap nilai KTK sangat rendah (Prasetyo dan Suriadikarta, 2006). Seperti halnya Ultisol, diketahui bahwa topografi atau bentuk permukaan tanahnya bervariasi dari

bergelombang sampai berbukit dengan ketinggian di atas muka laut (mdpl) lebih dari 3 m (Munir, 1996).

Untuk wilayah yang memiliki prospek baik, dalam pengembangan tanaman pangan seperti kedelai adalah pada topografi datar hingga bergelombang <15%. Hasil penelitian penerapan teknik konservasi tanah untuk pencegahan erosi pada tanah masam, terutama pada Ultisol dengan kemiringan antara 3-15% menunjukkan hasil nyata (Abdurachman *et al.*, 1985; Sudirman *et al.*, 1986; Undang Kurnia, 1996).

### **3.3. Vegetasi**

Sumber bahan organik yang paling umum bersumber dari vegetasi penutup tanah, sisa-sisa vegetasi, limbah atau kotoran ternak dan sebagainya. Tanah yang seluruh permukaannya tertutup dengan baik oleh vegetasi merupakan sumber bahan organik. Tanaman-tanaman penutup tanah tersebut kenyataannya dapat berfungsi melindungi permukaan tanah dari tumbukan butir-butir hujan yang mempunyai kemampuan pemecahan dan penghancuran terhadap agregat-agregat tanah, memperlambat kecepatan lajunya aliran air permukaan dengan demikian daya kikisnya dapat dikurangi, memperkaya bahan organik dalam tanah serta menambah besarnya porositas tanah (Kartasapoetra, 1989 *cit* Apulino, 2019).

Menurut Munir (1996) pengaruh vegetasi pada pembentukan Oxisol dihubungkan juga dengan keadaan iklim tropis, di mana yang dominan dalam hal ini adalah vegetasi hujan tropis, sabana dan lain-lain. Tanaman juga memengaruhi terbentuknya tanah masam contohnya jenis Leguminosa. Selama masa pertumbuhan tanaman Leguminosa terjadi penyerapan anion dan kation dengan perbandingan yang tidak seimbang, sehingga lebih mengasamkan tanah. Tanaman leguminosa menyerap hara nitrogen dari hasil fiksasi mikroba yang bersimbiosis dengannya. Tanaman non-leguminosa menyerap nitrogen dari sistem tanah dan penyerapan ini dalam kondisi yang seimbang dengan penyerapan kation-kation basa, sehingga lebih sedikit pertukaran dengan ion hidrogen, maka sedikit menyebabkan pengasaman tanah (Pusluhtan, 2019a).

### 3.4. Curah Hujan

Lahan kering masam pada umumnya terdapat di daerah dengan curah hujan tinggi (>2000 mm/tahun) dengan bulan basah lebih dari 6 bulan sehingga berpotensi menyebabkan terjadinya erosi dan tingginya pencucian basa-basa. Sebagian besar wilayah Indonesia memiliki variasi iklim dan curah hujan yang relatif tinggi. (Septiana *et al.*, 2021).

Curah hujan yang tinggi di sebagian besar wilayah Indonesia menyebabkan pelarutan dan penghanyutan kation-kation basa. Air yang berlebihan akan melarutkan basa-basa dari mineral primer batuan induk. Mineral primer anortit, albit, dan biotit yang mendominasi batuan induk akan larut ketika curah hujan tinggi. Larutnya mineral primer tersebut diikuti dengan terbebasnya sejumlah kation basa ke dalam larutan tanah.

Tingginya curah hujan di sebagian wilayah Indonesia menyebabkan tingkat pencucian hara tinggi terutama basa-basa, sehingga basa-basa dalam tanah akan segera tercuci keluar lingkungan tanah dan yang tinggal dalam kompleks adsorpsi liat dan humus adalah ion H dan Al. Akibatnya tanah menjadi bereaksi masam dengan kejenuhan basa rendah, dan menunjukkan kejenuhan aluminium yang tinggi (Subagyo *et al.*, 2000). Variasi iklim dan curah hujan yang relatif tinggi di sebagian besar wilayah Indonesia mengakibatkan tingkat pencucian basa di dalam tanah cukup intensif, sehingga kandungan basa-basa rendah dan tanah menjadi masam (Subagyo *et al.*, 2000).

Suhu dan curah hujan yang tinggi serta drainase yang baik menyebabkan tanah mineral masam khususnya oxisol mengalami pelapukan dan pencucian yang intensif. Hal ini ditandai dengan terbentuknya selain kaolinit juga mineral besi oksid-hidroksida atau goetit atau FeO(OH). Oxisol biasanya sedikit mengandung mineral mudah lapuk tapi banyak mengandung mineral yang resistan terhadap pelapukan seperti kuarsa dan mineral oksid-hidroksida sehingga potensi kesuburan tanahnya rendah (Nursyamsi, 2005).

## BAB IV

---

# SUMBER KEMASAMAN TANAH

Sumber kemasaman tanah berasal dari sejumlah proses seperti curah hujan dan respirasi akar, pemberian pupuk buatan, oksidasi sulfur dan oksidasi pirit, dekomposisi bahan organik, dan hidrolisis aluminium (Pusluhtan, 2019).

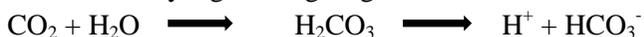
### 1. Curah Hujan dan Respirasi Akar

Curah hujan yang tinggi ditambah lagi dengan temperatur yang tinggi menyebabkan terjadinya pelapukan yang intensif, proses mineralisasi berjalan sangat intensif. Air yang berlebih menyebabkan pencucian hasil-hasil mineralisasi terutama kation-kation basa (Ca, Mg, K, Na) yang mengakibatkan pada kompleks jerapan tanah dipenuhi oleh ion  $H^+$  dan  $Al^{3+}$ .

$CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$  di udara terlarut dalam air dan beraksi menjadi asam karbonat, asam sulfit dan asam sulfat. Asam-asam ini akan menyebar ke segala penjuru lewat selokan, anak sungai, kembali lagi naik ke waduk, dam kembali ke persawahan. Sumber gas-gas tersebut bisa karena letusan gunung api, asap pembakaran hutan, pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor, dan pembakaran-pembakaran lain yang sebagian besar menghasilkan gas  $CO_2$  (misalnya pembakaran sampah yang terjadi di mana-mana).

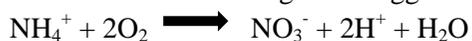
Tanaman juga menghasilkan gas  $CO_2$  karena proses respirasi akar, dan selama periode pertumbuhan aktif akar dapat menyebabkan gas  $CO_2$  di tanah yang konsentrasinya lebih tinggi beberapa kali dari di atmosfer, sehingga terjadi peningkatan jumlah gas  $CO_2$  terlarut dalam air tanah dan menyebabkan peningkatan keasaman tanah atau pH menjadi lebih rendah.

Reaksi kimia yang berlangsung:



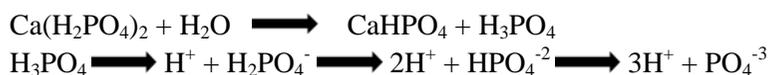
## 2. Pemberian Pupuk Buatan

Pupuk yang mengandung amonium ( $\text{NH}_4^+$ ) sebagai sumber nitrogen bisa menjadi penyebab kemasaman tanah. Oksidasi  $\text{NH}_4^+$  menghasilkan ion nitrat dan ion hidrogen sehingga menyebabkan pengasaman tanah.



Dengan demikian, 2 atom hidrogen dihasilkan setiap molekul amonium teroksidasi sehingga dapat disimpulkan sebagai penyebab kemasaman apabila diaplikasikan.

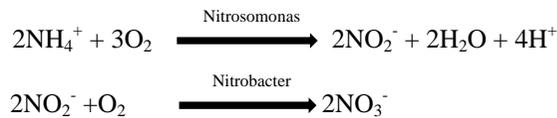
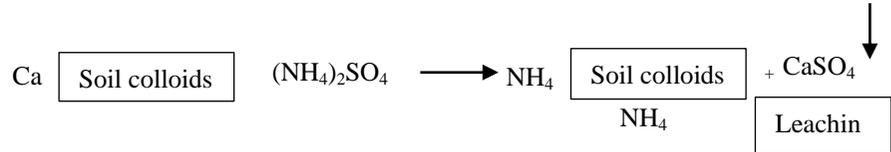
Monokalsium fosfat ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) yang sering digunakan sebagai salah satu komponen pupuk juga menjadi faktor penyebab terjadinya proses pengasaman tanah (meskipun lebih rendah daripada amonium). Senyawa ini akan terhidrolisis dalam air membentuk fosfat dikalsium dan Asam fosfat.



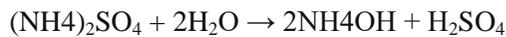
Secara umum, ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ) tersebut akan terlarut pada pH di atas netral, sehingga tidak termasuk faktor penyebab pengasaman tanah. Akan tetapi, kedua ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ) yang sudah terlarut dalam kisaran pH tanah asam, termasuk faktor penyebab kemasaman tanah. Pupuk fosfor diberikan dalam lubang tugal akan menyebabkan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  terdisosiasi dalam tanah sehingga terjadi nilai pH yang sangat rendah di dekat pupuk tersebut. Tingkat keasaman ini akan secara bertahap menyebar ke dalam tanah sekitar lokasi pupuk.

Menurut Nadarajan dan Surya (2021), ketika amonium sulfat ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) diaplikasikan pada tanah dataran tinggi, reaksi pertama yang terjadi adalah pertukaran kation, di mana amonium ( $\text{NH}_4^+$ ) menggantikan beberapa kation lain, biasanya kalsium, pada kompleks pertukaran tanah. Kalsium sulfat yang terbentuk [ $\text{CaSO}_4$ ] larut dalam air sebagian diserap oleh tanaman tetapi sebagian besar tercuci melalui tanah saat hujan dengan intensitas tinggi. Dengan cara ini, terjadi hilangnya kalsium tanah ( $\text{Ca}^{2+}$ ) setelah pemupukan amonium sulfat. Amonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pada koloid tanah dapat terserap langsung oleh tanaman atau melalui nitrifikasi. Proses biologis oksidasi  $\text{NH}_4^+$  ke  $\text{NO}_3^-$  diketahui sebagai nitrifikasi. Ini adalah

proses dua langkah di mana amonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pertama-tama diubah menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) oleh nitrosomonas dan kemudian menjadi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oleh nitrobakter. Prosesnya dapat dijelaskan melalui reaksi berikut.



Reaksi ini menunjukkan bahwa ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ) terbentuk selama nitrifikasi yang kemudian mengakibatkan pengasaman tanah dan selanjutnya menurunkan pH tanah sehingga menyebabkan keasaman tanah. Inilah alasan mengapa disebut pupuk amonium bersifat asam fisiologis. Menurut Kusumawati (2021) Pupuk fisiologis masam adalah pupuk bila digunakan terus menerus dalam jumlah besar akan menyebabkan penurunan pH tanah. Contoh untuk tipe ini adalah pupuk Urea dan ZA sebagai sumber hara N. Reaksi yang terjadi yaitu:



Tanaman akan mengikat dan menggunakan  $\text{NH}_4$  untuk pertumbuhan tanaman, sehingga menyisakan  $\text{SO}_4$  ke larutan tanah.  $\text{SO}_4$  bertemu dengan lengas tanah akan menyebabkan penurunan pH tanah. Penggunaan pupuk, terutama yang mengandung nitrogen, sering dituding sebagai penyebab keasaman tanah. Keasaman dihasilkan ketika bahan yang mengandung amonium diubah menjadi nitrat di dalam tanah. Semakin banyak pupuk nitrogen amonia yang diterapkan, semakin asam tanahnya (Zhang, 2017).

### 3. Dekomposisi Bahan Organik

Keasaman tanah juga dapat dihasilkan oleh penguraian sisa tanaman atau sampah organik menjadi asam organik. Hasil dekomposisi bahan organik akan berlanjut dengan polimerisasi dan menghasilkan produk berupa humus. Humus terdiri atas asam humat, asam fulfat dan humin

yang relatif stabil di dalam tanah. Hasil penguraian berupa beberapa jenis gugus fungsi yang mampu menarik dan memisahkan ion hidrogen. Kekuatan asam yang dihasilkan bergantung pada sifat gugus fungsi dominan. Ada beberapa asam humat yang dihasilkan dari bahan heterogen tersebut. Oleh karena itu, keasaman tanah yang timbul dari deprotonasi asam organik bergantung pada vegetasi (Hudnall, 1991).

Bahan organik tidak berperan langsung dalam pengasaman tanah, namun hanya berperan sebagai penukar kation (Van Breemen dkk., 1984). Bahan organik yang terdekomposisi dalam tanah akan melepaskan unsur hara makro maupun mikro sehingga dapat diserap oleh tanaman (Rao dan Subba, 1994; Murbandodo, 1998). Pelepasan unsur hara tersebut akan memengaruhi kemasaman pada tanah. Bahan organik hasil dekomposisi yang banyak menghasilkan unsur hara alkali akan meningkatkan pH tanah. Sebaliknya, jika bahan organik yang digunakan mengandung banyak asam-asam organik yang akan menurunkan pH tanah.

Bahan organik yang mengalami proses dekomposisi menghasilkan  $H^+$  yang bertanggung jawab atas keasaman. Karbon dioksida ( $CO_2$ ) yang dihasilkan oleh dekomposisi bahan organik bereaksi dengan air di dalam tanah membentuk asam lemah yang disebut asam karbonat ( $H_2CO_3$ ). Ini adalah asam yang sama yang terbentuk ketika  $CO_2$  di atmosfer bereaksi dengan hujan membentuk hujan asam secara alami. Beberapa asam organik juga dihasilkan oleh dekomposisi bahan organik, tetapi asam-asam tersebut juga merupakan asam lemah. Seperti halnya curah hujan, kontribusi terhadap perkembangan tanah masam akibat dekomposisi bahan organik umumnya sangat kecil, dan hanya efek akumulasi bertahun-tahun yang dapat diukur di lapangan (Zhang, 2017).

#### 4. Hidrolisis Aluminium

Kandungan Al dan  $H^+$  yang dihasilkan melalui proses hidrolisis aluminium sangat berperan sebagai penyebab kemasaman tanah.

Reaksi kimia yang terjadi:



Tanah yang terlalu masam akan menyebabkan racun bagi tanaman, karena banyak unsur aluminium (Al) sehingga berdampak pada pengikatan

fosfat yang dibutuhkan oleh tanaman. Al akan mengikat fosfor sehingga tidak dapat diserap oleh tanaman. Selain itu, kemasaman tanah juga meningkatkan unsur mikro yang sebenarnya tidak banyak dibutuhkan oleh tanaman.

#### 5. Tanaman

Pertumbuhan tanaman juga berkontribusi dalam pengasaman tanah. Proses penyerapan hara utama (K, Ca, dan Mg) melalui intersepsi akar disertai pertukaran dengan ion  $H^+$  sehingga juga menyebabkan terjadinya pengasaman tanah. Jenis tanaman tertentu juga memengaruhi pengasaman tanah, contohnya adalah tanaman Leguminosa. Selama masa pertumbuhan, tanaman Leguminosa terjadi penyerapan anion dan kation dengan perbandingan yang tidak seimbang, sehingga lebih mengasamkan tanah. Tanaman leguminosa menyerap hara nitrogen dari hasil fiksasi mikrobial yang bersimbiosis dengannya. Tanaman non-leguminosa menyerap nitrogen dari sistem tanah dan penyerapan ini dalam kondisi yang seimbang dengan penyerapan kation-kation basa, sehingga lebih sedikit pertukaran dengan ion hidrogen, maka sedikit menyebabkan pengasaman tanah.

## BAB V

---

# KARAKTERISTIK FISIKO-KIMIA DAN BIOLOGI TANAH MINERAL MASAM

### 5.1. Karakteristik Fisika

Lahan kering masam didominasi oleh tanah jenis Ultisol dan Oxisol, mempunyai tingkat perkembangan yang cukup lanjut, dicirikan oleh penampang tanah yang dalam, kenaikan fraksi liat seiring dengan kedalaman tanah, reaksi tanah masam, dan kejenuhan basa rendah (Sri Adiningsih dan Mulyadi, 1993). Perkembangan tanah yang lanjut menyebabkan warna tanah pada lahan kering masam kuning kecokelatan hingga merah dengan variasi hue dari 10 YR hingga 10 R, nilai *value* 3-6 dan kroma 4-8 (Rahim *et al.*, 1997, Alkasuma 2000).

Terdapat hubungan antara warna tanah dengan kadar goetit (FeO(OH)) dan hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) di mana makin cokelat warna tanah makin tinggi kadar goetit dan makin merah warna tanah makin tinggi kadar hematit (Schwertmann dan Taylor, 1989). Struktur tanah lahan kering masam umumnya sedang sampai kuat dengan bentuk gumpal bersudut (Isa *et al.*, 2004).

Ciri lainnya yang penting adalah adanya peningkatan fraksi liat dalam jumlah tertentu pada horizon tanah bagian bawah yang dikenal dengan horizon argilik pada Ultisol. Horizon tersebut dapat dikenali dari fraksi liat hasil analisis di laboratorium maupun dari penampang profil tanah. Horizon argilik umumnya kaya akan Al sehingga peka terhadap perkembangan akar tanaman, yang menyebabkan akar tanaman tidak dapat menembus horizon ini dan hanya berkembang di atas horizon argilik (Soekardi *et al.*, 1993).

Kandungan bahan yang tersedia di dalam tanah akan memengaruhi karakteristik fisika setiap jenis tanah termasuk tanah mineral masam. Misalnya saja komposisi bahan organik dan liat pada tanah tersebut. Oxisol mempunyai kandungan liat  $\geq 40\%$  pada kedalaman 18 cm (Soil

Survey Staff, 1990) dengan adanya horizon oksik yang ditandai dengan teksturnya yang lempung berpasir atau lebih halus (Sarwono, 1985).

Secara morfologi, Oxisol biasanya berwarna merah yang disebabkan oleh banyaknya unsur Fe atau sesquioksida yang mengalami oksidasi. Agregat Oxisol yang terdiri dari partikel berukuran liat, mempunyai bentuk yang tidak teratur (dalam hal ini tidak bulat, tidak kubus, dan lain-lain). Agregat ini terdiri dari agregat primer yang tersusun dari partikel-partikel yang dilekatkan oleh suatu bahan yang berukuran liat. Oxisol mempunyai stabilitas agregat yang relatif tinggi karena mengandung sesquioksida yang tinggi serta liat. Liat dapat membentuk suatu ikatan yang stabil dan efektif. Sedangkan Ultisol mempunyai solum dengan kedalaman sedang (1 sampai 2 meter), warnanya merah sampai kuning dengan chroma meningkat dengan bertambahnya kedalaman, permeabilitas lambat sampai baik, dan erodibilitas tinggi (Munir, 1996).

Oxisol dan Ultisol mempunyai partikel liat yang jauh lebih tinggi dari debu dan pasir yaitu hampir 60-80%. Hal ini berarti kemampuan retensi air tanah sangat tinggi. Akan tetapi, jumlah air yang tersedia bagi pertumbuhan tanaman tidak linier dengan kemampuan retensi maksimum atau total ruang pori, tetapi ditentukan oleh jumlah pori yang berukuran 2-8.6  $\mu\text{m}$ . Jika kedua tanah mempunyai struktur yang bukan remah, atau kandungan bahan organik tanah rendah, maka tanah ini akan kekurangan oksigen bagi pertumbuhan tanaman, atau aerasi tanah kurang lancar. Pada kondisi yang demikian, pernafasan akar tanaman juga bisa terganggu, dan perkembangan jamur bisa membahayakan tanaman (Yulnafatmawita, 2007).

Namun, Oxisol mempunyai struktur yang baik untuk mendukung mudahnya tanah meloloskan air setelah hujan sehingga tidak rentan tergenang. Struktur granular yang kuat ternyata menyebabkan sebagian besar Oxisol mempunyai permeabilitas yang jauh lebih cepat daripada yang diperkirakan oleh kelas distribusi ukuran partikel. Meskipun pemadatan dan penurunan permeabilitas dapat disebabkan oleh budidaya, namun tanaman ini sangat tahan terhadap pemadatan sehingga drainase lancar dan dapat segera diolah setelah hujan karena tidak ada genangan (Eswaran dan Reich, 2007).

## 5.2. Karakteristik Kimia

Secara umum tanah mineral masam mempunyai karakteristik kimia yang relatif bermasalah, karena tanah ini umumnya berasal dari bahan induk masam dan dipengaruhi oleh curah hujan yang tinggi sehingga terjadi pencucian basa-basa seperti dijelaskan pada bab III. Secara lengkap karakteristik kimia tanah mineral masam disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Karakteristik kimia tanah mineral masam

Karakteristik Kimia	Tanah Mineral Masam	Sumber
pH tanah rendah	- pH < 5,5	Pusluhtan, 2019a
	- Ultisol pada kawasan hutan (tanah asli) pH-nya berkisar antara 4,2-4,3 tergolong tanah sangat masam.	Sudaryono, 2009
	- pH lebih rendah dari 4,5 dalam sistem tanah.	Pusluhtan, 2019b
	- pH < 5,0	Erfandi, 2013
Kandungan Fe dan kejenuhan Al tinggi	- Fe tinggi (416,02 ppm) dan kejenuhan Al tinggi (62,07%)	Herviyanti <i>et al.</i> , 2012
	- Bentuk Al yang sangat toksik bagi tanaman adalah $Al(H_2O)_6^{3+}$ atau lebih dikenal sebagai $Al^{3+}$ .	Marschner 1995; Kochian 1995; Kochian <i>et al.</i> , 2004; Miyasaka <i>et al.</i> , 2007
Fiksasi P tinggi	- P-tersedia pada tanah mineral masam di Padang Siantah, Lima Puluh Kota, Sumatra Barat adalah 9,98 ppm.	Herviyanti <i>et al.</i> , 2019
	- Unsur Al dan Fe yang banyak larut pada tanah masam akan mudah mengikat P, sehingga penambahan pupuk P kurang bermanfaat bagi tanaman dan efisiensi pemupukan P menjadi rendah.	Pusluhtan, 2019
	- Tanah-tanah dengan keterbatasan P di daerah tropis umumnya (43%) tergolong pada ordo Oxisols dan Ultisols.	Sanchezdan Uehara 1980
Kandungan bahan organik rendah	- Kandungan bahan organik Ultisol di wilayah Kalimantan Timur	Sudaryono, 2009

Karakteristik Kimia	Tanah Mineral Masam	Sumber
	umumnya rendah (0,67-1,57%) akibat dari pencucian basa berlangsung intensif, dan sebagian terbawa erosi.	
	- Kadar bahan organik tanah rendah (0,72%) di wilayah Padang siantah, Lima Puluh Kota, Sumatra Barat.	Herviyanti <i>et al.</i> , 2019

Pada Tabel 5.1 dapat dilihat bahwa karakteristik kimia tanah mineral masam menunjukkan berbagai permasalahan sehingga menjadi penyebab rendahnya kesuburan tanah. Seperti dijelaskan pada bab II dan III bahwa karakteristik tanah tersebut perlu diupayakan pembenahannya melalui teknologi-teknologi ameliorasi dengan bahan baku yang melimpah bersumber dari alam. Setiap jenis tanah masam ditandai dengan pH yang rendah, akumulasi Al dan Fe di dalam tanah, dan kurangnya nutrisi di dalam tanah. Namun, setiap tanah masam juga mempunyai kadar yang berbeda-beda dari setiap ciri-ciri umum tanah masam tersebut salah satunya disebabkan oleh tingkat pelapukannya. Tanah Ultisol dinilai lebih bermasalah dibandingkan Inceptisol dikarenakan tanah Ultisol merupakan tanah dengan pelapukan lanjut sehingga unsur-unsur di dalam tanah sudah lama terdegradasi.

Kandungan Fe-bebas cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah. Anda *et al.* (2000) mengungkapkan bahwa semakin lanjut perkembangan tanah, semakin meningkat retensi P yang disebabkan oleh meningkatnya Fe-oksida. Kandungan hara P maupun K yang sangat rendah berkaitan dengan susunan mineral atau cadangan mineral tanah marginal yang didominasi oleh kuarsa dan oksida (ilmenit, magnetit, dan rutil) dan sangat sedikit mineral sumber hara lainnya (Suharta, 2010). Selain itu juga sering terjadi kahat hara terutama unsur P, Ca, Mg, N, dan K. Pada tanah masam di bawah pH 5,5 akan terdapat daerah pertukaran kation yang proporsinya semakin meningkat untuk dijenuhi Al, terutama akan menggantikan kation polivalen ( $Ca^{2+}$  dan  $Mg^{2+}$ ); secara bersamaan Al akan berlaku sebagai pengikat P dan Mo. Persentase Al yang dapat ditukar akan berkorelasi erat dengan nilai pH

tanah dan pengaruhnya dalam pertumbuhan akar pada kebanyakan tanaman.

Dengan penurunan pH, jumlah Mn yang dapat ditukar meningkat pada beberapa tanah. Peningkatan dari Mn-dd juga merupakan fungsi dari potensial redoks ( $\text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+ + 2\text{e} \longrightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$ ). Beberapa tanah masam pada daerah tropis mengalami pengaruh iklim yang hebat, sehingga total kandungan Mn sering rendah, sehingga pada tanah-tanah semacam ini risiko keracunan Mn lebih sedikit dibandingkan dengan toksisitas Al (Marshner, 1995).

### 5.3. Karakteristik Biologi

Tanah mineral masam miskin biota tanah dan mikroorganisme sulit hidup dan berkembang karena faktor nutrisi dan ketersediaan habitat yang tidak sesuai. Hal ini disebabkan oleh karakteristik fisika dan kimia dari tanah tersebut. Penyebab utamanya yaitu kandungan Al yang tinggi pada tanah masam, kandungan C-organik yang rendah menyebabkan mikroorganisme tidak berkembang dengan baik, mungkin juga menjadi penyebab ketidakterersediaan hara tanah P dan K (Kasno, 2019).

Lahan kering masam Lampung Tengah mempunyai populasi mikroba yang sangat rendah, namun mempunyai keragaman jenis yang tinggi (Prihastuti *et al.*, 2006). Populasi mikroba pada lahan kering masam Lampung Tengah berkisar antara  $29,4 \cdot 10^1$  hingga  $14,8 \cdot 10^4$  cfu/gram tanah. Pada lahan yang subur mengandung lebih dari 100 juta mikroba per gram tanah (Isroi, 2005). Jenis mikroba yang paling mendominasi lahan kering masam adalah bakteri. Thompson (1991) menyatakan bahwa bakteri dapat hidup pada kisaran nilai pH yang lebih luas daripada jenis mikroba tanah lainnya. Bakteri yang mampu tumbuh pada pH masam dikenal sebagai bakteri asidofil.

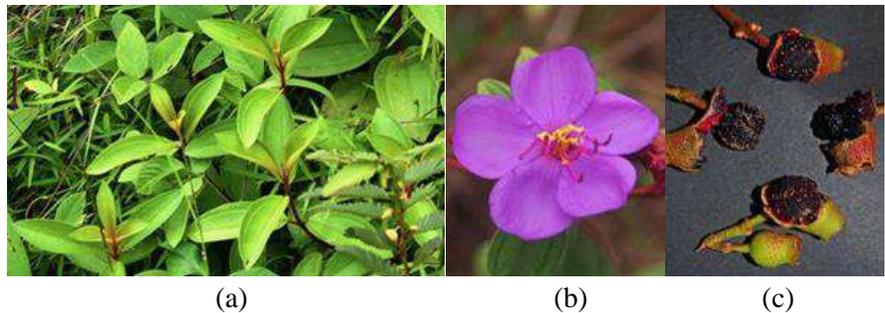
Populasi mikroba pada lahan kering masam umumnya rendah, berkisar antara  $57 \times 10^3$ - $29 \times 10^4$  cfu/g tanah (Prihastuti *et al.*, 2006). Pada lahan kering masam yang belum pernah ditanami kedelai, secara alamiah tanaman kedelai membentuk bintil akar sedikit sehingga kurang efektif menambat  $\text{N}_2$ -udara. Populasi rhizobium tanah Ultisol di Lampung Tengah sangat rendah, yakni  $5,8 \times 10^4$  cfu/g dan  $6,5 \times 10^1$  di Lampung Timur (Soedarjo *et al.*, 2007). Untuk meningkatkan kesuburan lahan

kering masam, populasi mikroba yang berperan dalam penyediaan hara dalam tanah harus ditingkatkan.

Beberapa vegetasi yang tumbuh pada lahan kering masam yaitu Sikaduduk, paku-pakuan, dan alang-alang.

### 5.3.1. Sikaduduk

Sikaduduk atau *Melastoma malabathricum* tergolong gulma berbahaya dan invasif, salah satu gulma yang cukup dominan ditemui di areal perkebunan. Gulma *M. malabathricum* merupakan gulma yang pertumbuhan dan perkembangbiakannya cukup cepat, karena gulma ini dapat menghasilkan biji yang banyak untuk berkembang biak (Madusari, 2016). Bentuk tumbuhan sikaduduk disajikan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 *Melastoma malabathricum*. (a) ranting dengan daun, (b) bunga, dan (c) buah yang sudah tua pecah.

Sikaduduk merupakan jenis tumbuhan dengan area penyebaran yang paling luas dibandingkan dengan jenis-jenis lain dari genus *Melastoma*. Penyebaran jenis ini sangat berbeda dengan jenis *Melastoma* lainnya, misalnya *M. montanum* merupakan endemik di New Guinea, *M. beccarianum* merupakan spesiasi allopatrik di Kalimantan, *M. minahassae* dan *M. perakense* hanya ditemukan di daerah pegunungan (Meyer, 2001). Hal ini juga didukung oleh sifatnya yang tahan terhadap cekaman aluminium (Al). Dapat diartikan gulma ini dapat tumbuh dominan meskipun dalam kondisi tanah yang kandungan Al tinggi yang pada dasarnya tidak mendukung untuk tumbuhan lainnya yang dapat meracuni tanaman. Menurut Watanabe *et al.* (1997) *M. malabathricum* mampu

mengakumulasi Al mencapai 14.4 g/kg berat kering daunnya tanpa mengakibatkan kematian.

Dengan meningkatnya kerapatan, maka gangguan yang ditimbulkan oleh tumbuhan yang satu dan yang lainnya akan semakin jelas dan meningkat. Respons tumbuhan terhadap adanya tekanan timbul dalam dua cara. Yang pertama melalui respons palastisitas yaitu terjadinya perubahan morfologi tumbuhan; yang kedua melalui kematian tumbuhan itu sendiri. Kedua respons ini dapat terjadi sebagai konsekuensi adanya kompetisi baik yang sesama maupun yang berlainan jenis atau adanya interaksi negatif jenis lainnya (Sastroutomo, 1990).

### **5.3.2. Paku-pakuan**

Tumbuhan paku merupakan tumbuhan *Cormophyta* berspora yang dapat hidup di berbagai habitat, baik sebagai tumbuhan epifit, terestrial, maupun sebagai tumbuhan akuatik. Tumbuhan paku dapat dibedakan menjadi dua bagian utama yaitu organ vegetatif yang terdiri dari akar, batang, rimpang dan daun. Sedangkan organ generatif terdiri atas spora, sporangium, anteridium, dan arkegonium.

Tumbuhan paku berperan penting dalam lingkungan. Tumbuhan ini membentuk humus, melindungi tanah dari erosi, menjaga kelembapan tanah, dan menjadi salah satu tumbuhan pionir pada tahap awal suksesi ekosistem hutan (Majid *et.al.*, 2022). pH tanah yang sesuai untuk pertumbuhan paku berkisar 5.5-6.5. Keasaman tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kandungan unsur tembaga (Cu), aluminium (Al), dan besi (Fe). Selain itu keasaman tanah juga disebabkan oleh dekomposisi bahan organik yang mengeluarkan kalsium (Ca). Tingginya curah hujan juga dapat memengaruhi keasaman tanah karena tercucinya unsur hara tanah. Jenis tumbuhan paku yang sering tumbuh di tanah masam yaitu *Gleichenia linearis* (Gambar 5.2).



Gambar 5.2 *Gleichenia linearis*  
(Plantamor, 2021; Majid *et al.*, 2022)

Menurut Hardini *et al.* (2009) *Gleichenia linearis* mempunyai tangkai daun majemuk membentuk garpu tiap tangkai garpu membentuk lagi garpu, daun yang letaknya melintang. Sori berbentuk lingkaran berada di bawah daun terdiri atas 2 sampai 12 sporangium yang duduk atau bertangkai pendek, tanpa selaput penutup, sporangium tertutup lingkaran yang horizontal dan membuka membujur. Daunnya bertoreh atau bersirip dalam, bercabang berbentuk sirip atau garpu. Rimpangnya menjalar.

### **5.3.3. Alang-alang**

Lahan alang-alang adalah lahan yang cukup potensial untuk pengembangan pertanian yang belum dimanfaatkan. Namun, lahan alang-alang biasanya tumbuh pada lingkungan yang ekstrem seperti lahan masam atau lahan dengan kandungan logam berat toksik. (Sastroutomo, 1990). Bentuk alang-alang disajikan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Alang-alang  
(Balqis *et al.*, 2022)

Dalam rangka meningkatkan nilai guna tumbuhan ini maka *Imperata cylindrica* dimanfaatkan sebagai adsorben logam berat. Hal ini didasarkan bahwa, setiap bagian tumbuhan mengandung biopolimer, di antaranya selulosa yang merupakan polisakarida arsitektural yang membentuk komponen serat dari dinding sel tumbuhan dan protein yang mengandung gugus fungsional: karboksilat, hidroksil, dan gugus amino yang dapat berinteraksi dengan logam (Hardini, 2009).

Alang-alang dapat pula menurunkan pH tanah, sehingga menyebabkan tanah menjadi masam (Marhamah, 1981 *cit* Hamdani, 2010). Alang-alang merupakan vegetasi yang menandakan tanah tersebut memiliki pH rendah dan unsur hara yang kurang, meskipun terdapat empat genus jamur pelarut fosfat yang sama dengan jamur pelarut fosfat yang terdapat pada sampel tanah hutan sekunder. Menurut Pudjiharta *et al.*, 2008 *cit* Palupi, 2015) tanah yang vegetasinya didominasi oleh alang-alang adalah tanah yang terdegradasi (penurunan kualitas kesuburan tanah) dan sangat miskin unsur hara.

Vegetasi di atas tanah juga akan memengaruhi dari sifat kimia tanah, salah satunya pH tanah. Vegetasi yang tumbuh berupa alang-alang (*Imperata cylindrica. L*), di mana alang-alang ini dapat menyebabkan pH tanah masam karena menyerap unsur hara dalam tanah, sehingga tanah

menjadi miskin unsur hara. Miskinnya unsur hara dalam tanah inilah yang memicu tanah menjadi masam (Palupi, 2015).

Pemanfaatan Ultisol yang didominasi vegetasi alang-alang sebagai lahan pertanian tentu mempunyai beberapa hambatan, di antaranya reaksi tanah yang masam sampai sangat masam, kelarutan ion Al, Fe, dan Mn yang tinggi, sehingga dapat bersifat racun bagi tanaman. Di samping itu kelarutan P yang rendah dan memiliki ketersediaan unsur hara yang terbatas (Yassir dan Omon, 2007).

## BAB VI

---

# KENDALA PENGELOLAAN TANAH MINERAL MASAM

Kendala utama yang sering dijumpai pada tanah masam di lahan kering beriklim basah adalah reaksi tanah yang masam, miskin hara, kandungan bahan organik rendah, kandungan Fe dan Al tinggi melebihi batas toleransi tanaman serta peka erosi sehingga tingkat produktivitasnya rendah (Hidayat *et al.*, 2000). Selain faktor iklim dan topografi, faktor bahan induk tanah merupakan faktor pembentuk tanah yang paling dominan pengaruhnya di Indonesia terhadap sifat dan ciri tanah yang terbentuk serta potensinya untuk pertanian (Buol *et al.*, 1980). Di samping itu pori tanah didominasi oleh pori mikro yang dapat menghambat perkecambahan biji, peresapan air infiltrasi, difusi O<sub>2</sub> ke dalam dan CO<sub>2</sub> dari dalam tanah.

### 6.1. Kesuburan Tanah Rendah

Pada umumnya tanah ini mempunyai potensi keracunan Al dan miskin kandungan bahan organik. Selain itu, kandungan hara terutama P dan kation-kation dapat ditukar seperti Ca, Mg, Na, dan K rendah, kapasitas tukar kation (KTK) rendah, dan peka terhadap erosi (Sri Adiningsih dan Mulyadi, 1993). Pengelolaan lahan kering masam yang intensif tanpa mempertimbangkan keseimbangan hara dapat menyebabkan rendahnya kandungan C-organik, hara makro primer dan sekunder, serta meningkatkan kemasaman tanah dan Al dapat dipertukarkan (Kasno, 2019). Rendahnya C-organik tanah menyebabkan sulitnya mikroorganisme untuk berkembang dan memperoleh nutrisi sesuai yang dijelaskan oleh Adiningsih dan Sudjadi (1993) dan Soepardi (2001) bahwa tanah mineral masam miskin elemen biotik.

## **6.2. Peka terhadap Erosi sehingga Produktivitasnya Rendah**

Seperti dijelaskan pada bab II Ultisol dan Oxisol banyak ditemukan pada daerah dengan kemiringan sehingga mempunyai kerentanan terhadap bahaya erosi, dan kesuburan tanah berada pada kedudukan yang paling mudah tererosi (Sudaryono, 2009). Stabilitas agregatnya lemah, yang menambah kerentanan tanah terhadap erosi di lahan berlereng (Buol *et al.*, 2003; Buring, 1979; Certini *and* Scalenghe, 2006; Faning *and* Faning, 1989; Tufaila *et al.*, 2011).

Lahan kering masam terbentuk pada tanah berombak sampai bergelombang, dengan kemiringan datar sampai 8% atau bahkan bisa 40% masih diusahakan untuk tanaman pangan. Pada kondisi demikian penataan lahan berupa penataan saluran pembuangan air dan penggunaan teknik konservasi perlu dilakukan. Kesesuaian tanaman pangan pada kemiringan lahan berlereng curam harus dievaluasi, baik aspek produktivitas maupun aspek lingkungan. Seberapa besar erosi yang ditimbulkan akibat pemanfaatan lahan berlereng yang kurang tepat (Kasno, 2019).

## **6.3. Menghambat Perkecambahan Biji, Peresapan Air Infiltrasi, Difusi O<sub>2</sub> ke dalam dan CO<sub>2</sub> dari Dalam Tanah**

Struktur tanah yang kurang berkembang dan lemah menyebabkan tanah mudah membentuk kerak permukaan karena benturan tetesan air hujan. Lapisan kerak menghambat perkecambahan biji, peresapan air infiltrasi, difusi O<sub>2</sub> ke dalam tanah untuk pernafasan akar dan jasad renik, dan difusi CO<sub>2</sub> sisa pernapasan dan perombakan bahan organik ke luar tanah (Buol *et al.*, 2003; Buring, 1979; Certini *and* Scalenghe, 2006; Faning *and* Faning, 1989; Tufaila *et al.*, 2011).

Lahan kering masam adalah lahan yang mempunyai sifat-sifat seperti pH rendah, kapasitas tukar kation (KTK), kejenuhan basa (KB) dan C-organik rendah, kandungan aluminium (kejenuhan Al) tinggi, fiksasi P tinggi, kandungan besi dan mangan mendekati batas meracuni tanaman, peka erosi, dan miskin unsur biotik (Adiningsih dan Sudjadi, 1993; Soepardi, 2001). Selain itu, tanah-tanah yang terbentuk umumnya merupakan tanah berpenampang dalam, berwarna merah-kuning, dan mempunyai kesuburan alami yang rendah.

Fraksi liat tanah mineral masam umumnya didominasi oleh mineral tipe 1:1, oksida dan hidroksida Fe dan Al yang aktivitasnya rendah dan kompleks pertukarannya bermuatan positif (Uehara dan Gillman, 1981). Hal tersebut menyebabkan unsur fosfor (P) mudah terfiksasi dan tidak tersedia untuk tanaman. Oleh sebab itu, defisiensi P merupakan kendala yang sering terjadi pada tanah mineral masam.

Masalah utama pada lahan kering masam adalah kemasaman tanah dan kandungan Al tinggi, KTK, kejenuhan basa, dan C-organik rendah. Pengelolaan lahan kering masam yang intensif tanpa mempertimbangkan keseimbangan hara dapat menyebabkan rendahnya kandungan C-organik, hara makro primer dan sekunder, serta meningkatkan kemasaman tanah dan Al dapat dipertukarkan (Kasno, 2019).

Oleh karena itu, dapat dijabarkan bahwa tanah masam mempunyai permasalahan-permasalahan sebagai berikut:

1. Tingginya konsentrasi ion H sehingga menyebabkan plasmolisis pada akar tanaman,
2. Keracunan Al karena tingginya kejenuhan Al dalam tanah,
3. Kahat unsur P karena terikat kuat pada Al ataupun Fehidroksida,
4. Kekurangan Ca dan Mg,
5. Kekurangan unsur Mo, sehingga menghambat proses penambatan N udara oleh tanaman leguminosa,
6. Keracunan unsur mikro seperti Mn, Zn dan Fe yang kelarutannya sering tinggi pada tanah masam, tetapi dari sekian banyak masalah, yang paling menonjol adalah masalah keracunan Al dan kahat P.

Berdasarkan kriteria yang dikemukakan Van der Heide *et al.* (1992) suatu sistem pengelolaan tanah masam dapat dikatakan berkelanjutan atau *sustainable* apabila memenuhi beberapa tanda berikut:

1. Menekan penurunan produksi tanaman dari waktu ke waktu
2. Menekan gangguan gulma
3. Menekan serangan hama dan penyakit
4. Menekan erosi tanah
5. Mempertahankan keberagaman tanaman (diversifikasi)

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiningsih, J. dan Sudjadi, M. 1993. Peranan sistem bertanam lorong (Alley Cropping) dalam meningkatkan kesuburan tanah pada lahan kering masam. (Risalah Seminar). Bogor: Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Anda M, Suharta N, Ritung S. 2000. Development of soils derived from weathered sedimentary, granitic and ultrabasic rocks in South Kalimantan: I. mineralogical and chemical properties. *Jurnal Tanah dan Iklim*. No. 18:1-12.
- Anda M., J. Shamshuddin, C.I. Fauziah, S.R. Syed Omar. 2007. Mineralogy and factors controlling charge development of three Oxisols developed from different parent materials. *Geoderma* 143, 153-167.
- Anna Kusumawati. 2021. *Buku ajar Kesuburan tanah dan Pemupukan*. Poltek LPP Press: Yogyakarta
- Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 2015. *Sumber Daya Lahan Pertanian Indonesia Luas, Penyebaran, dan Potensi Ketersediaan*. IAARD Press: Jakarta.
- Balqis A., Andi Asjayani, Rony Novianto. 2022. Potensi Bioherbisida dari Tanaman yang Mengandung Senyawa Allelopati. Diakses 24 Mei 2023, <https://ditjenbun.pertanian.go.id/potensi-bioherbisida-dari-tanaman-yang-mengandung-senyawa-allelopati/>.
- Buol, S.W., R.J. Southard, R.C. Graham, and P.A. Mcdaniel, 2003. *Soil genesis and classification*. The Iowa State University Press. Ames.
- Buring, 1979. Introduction to the study of soil in tropical, and subtropical regions. Edisi Indonesia: Pengantar pengkajian tanah-tanah wilayah tropika dan subtropika tahun 1991. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Certini, G. and R. Scalenghe, 2006. *Soil: Basic concepts and future challenger*. Cambridge University Press.
- D. S. Radianingsih, Pujiastuti and S. A. H. Aprilya. 2017. Inventarisasi Tumbuhan Paku (Pteridophyta) di Pos Rowobendo-Ngagelan Taman Nasional Alas Purwo Kabupaten Banyuwangi, *Bioeksperimen LIPI*.

- Erfandi D. 2013. Rehabilitasi Lahan Kering Masam Untuk Pengembangan Komoditas Tanaman Kedelai (*Glycine Max*). *Prosiding Seminar Nasional Matematika, Sains, dan Teknologi*. Volume 4, C.37-C.45.
- Esmaran H. dan P. F. Reich. 2007. World Soil Map. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 352-365. Washington: Elsevier.
- Faning, D.S. and M.C.B. Faning, 1989. *Soil morphology, genesis, and classification*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Hardini R., Ina Risnawati, Awin Fauzi, Noer Komari. 2009. Pemanfaatan Rumput Alang-Alang (*Imperata Cylindrica*) Sebagai Biosorben Cr(Vi) Pada Limbah Industri Sasirangan Dengan Metode Teh Celup. *Sains dan Terapan Kimia*, 2(1) 57-73.
- Herviyanti, Chici Anche, Gusnidar, Irwan Darfis. 2012. Perbaikan Sifat Kimia Oxisol dengan Pemberian Bahan Humat dan Pupuk P untuk Meningkatkan Serapan Hara dan Produksi Tanaman Jagung (*Zea mays*, L.). *Jurnal Solum*, 9(2), 5-60.
- Herviyanti, Azwar Chan, Yusnaweti, Teguh Budi Prasetyo, Mimien Harianti. 2019. Chemical properties of Oxisols treated with humic materials from subbituminous coal. *Asian J Agric & Biol:Special Issue*, 254-260.
- Hidayat, A. dan A. Mulyani. 2002. Lahan Kering untuk Pertanian. Buku Teknologi Pengelolaan Lahan Kering Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor. Hlm 246.
- Kasno A., 2019. Perbaikan Tanah untuk Meningkatkan Efektivitas dan Efisiensi Pemupukan Berimbang dan Produktivitas Lahan Kering Masa (makalah review), *Jurnal Sumberdaya Lahan* 13(1), 27-40.
- Madusari S. 2016. Analisis tingkat kematian gulma *melastoma malabathricum* menggunakan bahan aktif metil metsulfuron pada tingkat konsentrasi yang berbeda di perkebunan kelapa sawit. *Jurnal Citra Widya Edukasi*, 8(3): 236-249.
- Majid, A., Aulia A., Sri Aminarti. 2022. Keragaman Tumbuhan Paku (*Pteridophyta*) di Taman Biodiversitas Hutan Hujan Tropis Mandiangin. *Jurnal Al-Azhar Seri Sains dan Teknologi*, 7(2), 102-112.

- Meyer K. 2001. Revision of The Southeast Asian Genus *Melastoma* (*Melastomataceae*). *Blumea* 46, 351-398.
- Mulyani, A., A. Priyono and F. Agus. 2013. Chapters 24: Semiarid Soils of Eastern Indonesia: Soil Classification and Land Uses. Developments in Soil Classification, Landuse Planning and Policy Implications. *Springer*. pp 449-466.
- Nursyamsi D. dan Suprihati. 2005. Sifat-sifat Kimia dan Mineralogi Tanah serta Kaitannya dengan Kebutuhan Pupuk untuk Padi (*Oryza sativa*), Jagung (*Zea mays*), dan Kedelai (*Glycine max*). *Bul. Agron*, (33) (3) 40-47
- Palupi N. Puspita. 2015. Analisis Kemasaman Tanah dan C Organik Tanah Bervegetasi Alang Alang Akibat Pemberian Pupuk Kandang Ayam Dan Pupuk Kandang Kambing. *Media Sains*, 8(2), 182-188.
- Pusluhtan Kementan. 2019a. Kemasaman Tanah. Diakses 29 Mei 2023, <http://cybex.pertanian.go.id/mobile/artikel/80747/KEMASAMAN-TANAH/>.
- Pusluhtan Kementan. 2019b. Solusi Tanah Pertanian Keracunan Aluminium dan Besi. Diakses 29 Mei 2023. <http://cybex.pertanian.go.id/mobile/artikel/89242/Solusi-Tanah-Pertanian-Keracunan--Aluminium-Dan--Besi/>.
- Prihastuti. 2007. isolasi karakterisasi mikoriza vesikular arbuskular di lahan kering masam, Lampung Tengah. *Berkala Penelitian Hayati*: 12, 99-106.
- R. Rukmana, 1997. *Perawatan dan Pembibitan Paku Hias*, Yogyakarta: Kanisus,.
- Rao, N.S. and Subba, 1994. *Microorganisme Tanah dan Pertumbuhan*. Universitas Indonesia Press: Jakarta. 353p.
- Resman, A.S. Syamsul, dan H.S. Bambang. 2006. Kajian beberapa sifat kimia dan fisika inceptisol pada toposekuen lereng selatan gunung merapi kabupaten sleman. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. Vol. 6 (2):101-108.
- Rismunandar dan M. Ekowati. 1991. *Tanaman Hias Paku-pakuan*, Penebar Swadaya: Jakarta.
- Sastroutomo, S. S. 1990. *Ekologi Gulma*. Gramedia Pustaka: Jakarta.

- Silalahi, M. 2020. Kajian Bioaktivitas Senduduk (*Melastoma malabathricum*) dan Pemanfaatannya. *Biology education Science & Technology*, 3(2), 98-107.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10<sup>th</sup> Edition. United States Department of Agriculture (USDA), Washington, DC.
- Soil Survey Staff, 2010. Keys to soil taxonomy. United States Departement of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Subagyo, H., N. Suharta, AB. Siswanto. 2000. Sumberdaya Lahan Indonesia dan Pengelolaannya. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Soedarjo, M., Prihastuti, Suryantini, D. Suchayono, dan A. Harsono. 2007. Teknologi perakitan pupuk hayati pada tanaman kacang-kacangan di lahan kering masam. Laporan Akhir 2007. Balai Penelitian Tanaman Kacang-kacangan dan Umbi-umbian.
- Sudaryono. 2009. Tingkat Kesuburan Tanah Ultisol Pada Lahan Pertambangan Batubara Sangatta, Kalimantan Timur. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 10(3), 337-346.
- Suharta Nata. 2010. Karakteristik Dan Permasalahan Tanah Marginal Dari Batuan Sedimen Masam Di Kalimantan. *Jurnal Litbang Pertanian*, 29(4), 139-146.
- Tufaila, M., B.H. Sunarminto, D. Shiddieq, and A. Syukur, 2011. Characteristics of soil derived from ultramafic rocks for extensification of oil palm in Langgikima, North Konawe, Southeast Sulawesi. *J. Agrivita* 33 (1):93-102.
- Watanabe T, M Osak and T Tadano. 1997: Aluminum-induced growth stimulation in relation calcium, magnesium, and silicate nutrition in *Melastoma malabathricum* L. *Soil Sci. Plant Nutr*, 43(4): 827-837.
- Yassir I dan Mulyana Omon. 2007. Pengaruh Dosis Pupuk Organik Terhadap Pertumbuhan Mahoni (*Swietenia Macrophylla* King) Pada Lahan Alang-Alang Di Samboja, Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian dan Konservasi Alam*, 4(4), 377-384.
- Yulnafatmawita, Asmar, Ari Ramayani. 2007. Kajian Sifat Fisika Empat Tanah Utama. *Jurnal Solum*, 4(2), 81-9.

Zhang H., 2017. "Cause and Effects of Soil Acidity". Cause and Effects of Soil Acidity | Oklahoma State University (okstate.edu). Diakses 4 Oktober 2023.

## BAB VII

---

# TEKNOLOGI AMELIORASI TANAH MINERAL MASAM DENGAN BAHAN ORGANIK

Karakteristik tanah mineral masam umumnya mempunyai kandungan bahan organik yang rendah seperti dijelaskan pada BAB V.2. Di samping itu berbagai jenis aktivitas manusia dapat menurunkan kandungan bahan organik tanah dan aktivitas biologis, terutama pada tanah mineral masam. Namun, untuk meningkatkan atau mempertahankan kandungan bahan organik tanah membutuhkan upaya berkelanjutan yang mencakup mengembalikan bahan organik ke tanah dan rotasi tanaman beresidu tinggi dan tanaman yang berakar dalam atau rapat. Sulit untuk meningkatkan kandungan bahan organik dari tanah yang beraerasi baik seperti tanah berpasir kasar dan tanah pada daerah beriklim hangat-panas dan kering dengan residu organik yang terurai dengan cepat. Kandungan bahan organik dapat terjaga pada tanah yang memiliki sedikit residu organik dengan kondisi tekstur halus pada daerah beriklim lembap-basah dengan aerasi terbatas (Bot *and* Benites, 2005).

Meningkatnya kekhawatiran mengenai dampak lingkungan dan ekonomi dari produksi tanaman konvensional telah merangsang minat dalam menemukan alternatif untuk meningkatkan atau mempertahankan bahan organik tanah. Namun, prinsipnya tetap didasarkan pada meningkatkan produksi biomassa untuk mempertahankan bahan organik aktif yang dapat menyediakan makanan dan habitat untuk organisme yang berguna bagi tanah. Bahan organik tanah juga membantu dalam membentuk struktur dan porositas tanah, menyediakan nutrisi bagi tanaman, dan meningkatkan kemampuan menahan air tanah. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa mungkin untuk mengembalikan kadar bahan organik dalam tanah. Beberapa kegiatan yang mendorong akumulasi dan memasok bahan organik seperti penggunaan tanaman

penutup tanah dan mengurangi pembakaran serta kegiatan yang mengurangi tingkat dekomposisi seperti mengurangi atau tanpa olah tanah, dapat pula meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah (Bot and Benites, 2005)

Banyak aktivitas yang telah dilakukan guna meningkatkan kandungan bahan organik dan produktivitas tanah mineral masam, salah satunya adalah dengan pemberian bahan organik. Beberapa sumber bahan organik yang akan dijelaskan dalam bab ini adalah pupuk hijau, pupuk kandang, kompos, bahan organik terhumifikasi, batubara muda, dan biochar.

## **7.1. Pupuk Hijau**

### **7.1.1. Sumber Pupuk Hijau**

Pupuk hijau adalah salah satu pupuk organik yang berasal dari bahan organik seperti hijauan berupa sisa panen maupun yang berasal dari penguraian sisa tanaman. Perbedaan yang dimiliki pupuk hijau dengan pupuk organik lainnya adalah tanaman sebagai sumber bahan organik langsung ditanam, dijadikan mulsa, sedangkan persamaan dengan pupuk organik lain bisa juga dikomposkan. Pupuk hijau merupakan salah satu sumber bahan organik yang sangat potensial. Berbagai jenis tanaman terutama kelompok kacang-kacangan (leguminosa) ataupun nonlegum dapat dijadikan sumber pupuk hijau seperti disajikan pada Gambar 7.1 dan Tabel 7.1.

*LEGUME*

*Canajun cajas*



*Vigna radiata*



*Glycine max*



*Vigna Unguiculata*



*Arachis hypogea*



*non-grain, aroma and beat legumes*

*Cyamopsis Tetragonoloba*



*Crotalaria juncea*



*Sesbania aculeata*



*Indigofera tinctoria*



*Trifolium alexandrinum*



*Vicia faba*



*Lupinus angustifolius*



*Trigonella foenumgraecum*



*Medicago sativa*



*Trifolium pratense*



*Trifolium repens*



Perdu serbaguna dan pepohonan yang bisa dijadikan pupuk hijau

*Stylosanthes*



*Desmodium*



*Centrosema*



*Leucaena leucocephala*



*Gliricidia spp.*



*Cassia stamea*



*Delonix elata*



*Vitex negundo*



*Delonix regia*



*Panicum maximum*



*Peltophorum ferrugineu*



*Pennisetum purpureum*



Rerumputan dan gulma subtropik dan sekitarnya

*Tripsacum laxum*



*Trianthema portulacastrum*



*Adhatoda vasica*



*Ipomoea carnea*



*Eichhornia crassipes*



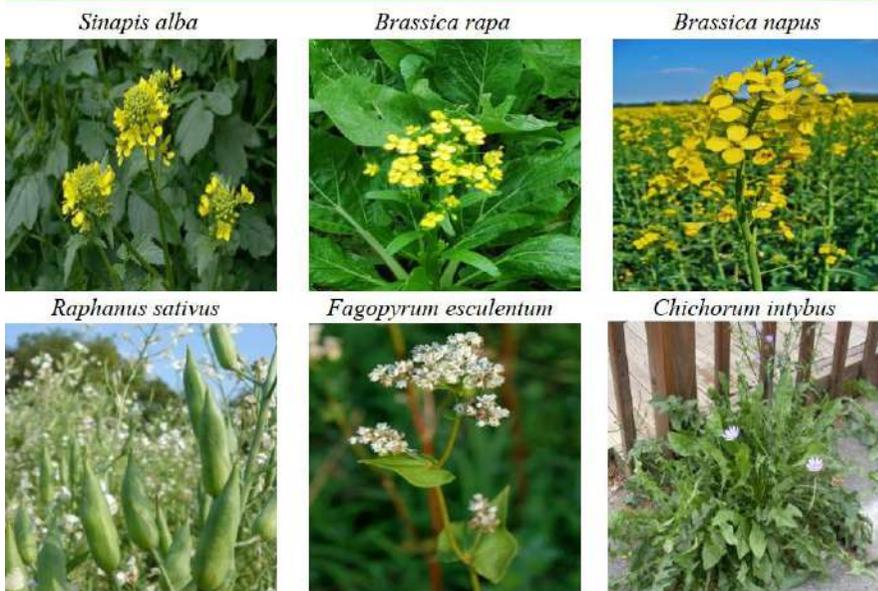
*Calotropis gigantea*



Tanaman dan rumput non-legume



Kubis-kubisan



Gambar 7.1 Beberapa tanaman yang dapat dijadikan sebagai pupuk hijau

Jenis tanaman/tumbuhan yang dijadikan sumber pupuk hijau diutamakan dari jenis legum, karena tanaman ini mempunyai kandungan hara (utamanya nitrogen total) yang relatif tinggi sekitar 36-209 kg N/ha (Dabney *et al.*, 2011) dibanding jenis tanaman lainnya. Namun demikian, sesungguhnya dari jenis nonlegum pun misalnya sisa tanaman jagung, ubi-ubian, jerami padi, dan lain-lain, dapat juga dimanfaatkan sebagai sumber pupuk hijau, karena meskipun kandungan nitrogennya relatif rendah, namun beberapa unsur lainnya seperti kalium relatif tinggi.

Alasan lain dipilihnya jenis legum sebagai pupuk hijau adalah karena tanaman atau sisa tanaman dari jenis legum relatif lebih mudah terdekomposisi, sehingga penyediaan haranya menjadi lebih cepat. Tanaman atau sisa tanaman dari jenis nonlegum sebaiknya dikomposkan terlebih dahulu bila akan digunakan sebagai pupuk organik, atau sering pula dimanfaatkan sebagai bahan mulsa (dimulsakan).

Beberapa spesies tanaman yang dapat dijadikan sebagai pupuk hijau seperti yang telah dirangkum oleh Maitra *et al.* (2018) yang dapat ditemukan di Indonesia sebagai berikut:

Tabel 7.1 Beberapa tanaman yang dapat digunakan sebagai pupuk hijau

No.	Nama Tanaman	Jenis
1	Kacang Gude, Kacang Kayo atau Kacang Bali ( <i>Cajanus cajan</i> )	
2	Kacang Hijau ( <i>Vigna radiata</i> )	
3	Kacang Kedelai ( <i>Glycine max</i> )	<i>Legume</i>
4	Kacang Tunggak ( <i>Vigna unguiculata</i> )	
5	Kacang Tanah ( <i>Arachis hypogea</i> )	
6	Kacang Guar ( <i>Cyamopsis tetragonoloba</i> )	
7	Orok-Orok ( <i>Crotalaria juncea</i> )	
8	Turi, Sesban Berduri, Jantar, Dhaincha ( <i>Sesbania species, S. aculeata</i> )	
10	Tarum ( <i>Indigofera tinctoria</i> )	
11	Semanggi Alexandria/Semanggi Mesir ( <i>Trifolium alexandrinum</i> )	<i>non-grain, aroma</i>
12	Kacang Babi, Kara Oncet, Kacang Dieng ( <i>Vicia faba</i> )	<i>and beat legumes</i>
13	Lupin Putih ( <i>Lupinus albus</i> )	
14	Kacang Lupin ( <i>Lupinus angustifolius</i> )	
15	Lupin Kuning ( <i>Lupinus luteus</i> )	
17	Klabet ( <i>Trigonella foenumgraecum</i> )	
21	Alfalfa ( <i>Medicago satvia</i> )	

No.	Nama Tanaman	Jenis
22	Semanggi Bawah Tanah ( <i>Trifolium subterraneum</i> )	
25	Semanggi Merah ( <i>Trifolium pratense</i> )	
26	Semanggi Putih ( <i>Trifolium repens</i> )	
27	Kacang Kupu-Kupu ( <i>Centosemia</i> )	
28	Stylo ( <i>Stylosanthes</i> )	
29	<i>Desmodium</i>	
30	Lamtoro ( <i>Leucaena leucocephala</i> )	
31	Gamal ( <i>Gliricidia</i> spp.)	
32	Johar, Juar ( <i>Cassia siamea</i> )	
33	<i>Derris indica</i>	
34	Mimba ( <i>Azadirachta indica</i> )	
35	Ketepeng kecil ( <i>Cassia tora</i> )	perdu serbaguna kasar dan
36	Kasingat ( <i>Cassia accidentalis</i> )	pepohonan yang
37	<i>Tephrosia candida</i>	cocok untuk pupuk
38	Kesek ( <i>Dodonea viscosa</i> )	daun hijau
39	<i>Hibiscus viscosa</i>	
40	Flamboyan Kuning ( <i>Delonix elata</i> )	
41	Flamboyan, Pohon Semarak Api ( <i>Delonix regia</i> )	
42	Soga ( <i>Peltophorum ferrugenum</i> )	
43	Sidondo ( <i>Vitex negundo</i> )	
44	Rumput Benggala ( <i>Panicum maximum</i> )	
45	Rumput Gajah ( <i>Pennisetum purpureum</i> )	
46	Rumput Guatemala ( <i>Tripsacum laxum</i> )	
47	Kacang Malabar ( <i>Aduthoda vesica</i> )	Rerumputan dan
48	<i>Eceng gondok (Eicchornia crassipes)</i>	Gulma <i>subtropic</i>
49	<i>Krokot Laut Daun Bulat (Trianthema portulacastrum)</i>	dan sekitarnya
50	<i>Krangkungan, Kangkung Pagar (Ipomoea carnea)</i>	
51	<i>Biduri (Calotropis gigantea)</i>	
52	Gandum Hitam ( <i>Secale cereale</i> )	
53	oats ( <i>Avena sativa</i> )	
54	Barli, Jelai ( <i>Hordeum vulgare</i> )	tanaman dan
55	Rumput Ryegrass ( <i>Lolium perenne</i> )	hijauan nonlegum
56	Rumput Italian Ryegrass ( <i>Lolium multiflorum</i> )	
58	Rumput Kucing ( <i>Dactylisglomerata</i> )	
59	Sesawi Putih ( <i>Sinapis alba</i> )	
60	Sawi Bunga ( <i>Brassica rapa</i> )	
61	Rapa ( <i>Brassica napus</i> )	
62	Lobak ( <i>Raphanus sativus</i> )	Kubis-kubisan
64	Soba, Gandum Kuda ( <i>Fagopyrum esculentum</i> )	
65	Chicory ( <i>Chichorium intybus</i> )	

(Sumber: Maitra *et al.*, 2018)

Tanaman penambat N seperti *Sesbania rostrata* (turi mini), *Aeshynomene*, dan *Azolla pinata* dapat pula digunakan sebagai pupuk hijau (Rachman *et al.*, 2006 dalam Suhartatik, 2010). Tanaman lainnya yang ketersediaannya melimpah sebagai pupuk hijau adalah *Tithonia diversolia* (paitan) dan biasanya disebut sebagai *tree marigold*, bunga matahari Meksiko atau kembang bulan. Tanaman ini banyak ditemukan di daerah telantar, pinggiran jalan, hingga pinggiran saluran air, mulai dari dataran rendah hingga dataran tinggi. Awalnya tanaman ini dikenal sebagai tumbuhan liar yang sangat agresif membentuk koloni sehingga menjadi gulma bagi tanaman budidaya (Chukwuka *et al.*, 2007) tetapi kemudian diketahui bahwa tanaman ini dapat dimanfaatkan sebagai pupuk hijau (Opala *et al.*, 2009; Crespo *et al.*, 2011). Bagian tithonia yang telah dicobakan untuk dijadikan pupuk hijau adalah bagian teratas yang masih berdaun hijau, sekitar 50-70 cm dari ujung tithonia. Hakim dan Agustian (2012) menemukan dari 70 cm teratas tithonia dengan umur sekitar 2 bulan setelah dipangkas menghasilkan bobot segar sebanyak 1.45-4.97 kg/m<sup>2</sup> (rata-rata 3.28 kg/m<sup>2</sup>) dan bobot kering 1.12-2.49 kg/m<sup>2</sup> kanopi (rata-rata 1.52 kg/m<sup>2</sup> kanopi). Jika dalam setahun dilakukan pemangkasan sebanyak 5 kali (periode pangkas sekitar 2 bulan), diperoleh biomas kering sebanyak 2.275 kg/m<sup>2</sup> per tahun. Jika ditanami saja 1/3 lahan dengan tithonia untuk memupuk 2/3 lahan maka akan diperoleh 7 ton/ha per tahun biomassa kering tithonia yang bisa digunakan sebagai pupuk hijau yang bermanfaat bagi tanaman.



Gambar 7.2 (a) *Sesbania rostrata* dan (b) *Tithonia diversolia* Juga Dapat Dijadikan Pupuk Hijau

*Sebania rostrata* tergolong ke dalam leguminoceae, yang mempunyai nodul pada akar dan batangnya. Tanaman ini mampu menambat N<sub>2</sub> sebanyak ± 4.7% lebih besar dari kacang tanah maupun kedelai yaitu sebanyak 56 sampai 150 kg/ha (Balai Penelitian Tanah, 2020). Hal ini dikarenakan tanaman ini menghasilkan nodul lima hingga sepuluh kali lebih banyak dari leguminoceae lainnya. Ditambah dengan pertumbuhannya yang sangat cepat yang memberikan hasil biomassa yang tinggi mencapai 8 hingga 11 ton/ha untuk ditanamkan ke tanah (Echo community, 2019). Kelebihan dari legum lain adalah mampu hidup pada kondisi tergenang seperti di rawa-rawa atau pada lahan sawah, tahan terhadap tingkat salinitas tinggi, tahan terhadap kekeringan (Kurniati, 2020). Oleh karena itu sangat memungkinkan untuk digunakan sebagai pupuk hijau

### **7.1.2. Karakteristik Pupuk Hijau**

Secara umum, tanaman pupuk hijau yang disarankan dalam simposium “*Green Manure in Rice Farming*” di IRRI pada tahun 1988 dalam Suhartatik (2010), adalah tanaman pupuk hijau yang memiliki keunggulan berumur pendek, cepat tumbuh, mampu menimbun hara dalam jumlah banyak, toleran terhadap naungan, kekeringan, dan genangan, adaptif terhadap ekologi yang luas, efisien dalam penggunaan air, kecepatan menimbun hara N tinggi, mudah ditanamkan, hasil biji tinggi, dan tahan terhadap hama dan penyakit. Syarat tanaman pupuk hijau (Kusumawati, 2021):

1. Cepat tumbuh
2. Produksi biomassa tinggi (banyak menghasilkan bahan organik)
3. Banyak mengandung N dan rasio C/N-nya rendah, biasanya tanaman *legume* (kacang-kacangan)
4. Dapat tumbuh pada tanah yang kurang subur (tanah marginal)
5. Bukan tanaman inang hama atau penyakit
6. Tidak membutuhkan pemeliharaan yang baik dan tidak merintang kehidupan tanaman pokok
7. Mudah dipangkas dan tidak berkayu
8. Resistan (tahan) terhadap hama dan penyakit
9. Dapat menekan pertumbuhan gulma

## 10. Efisien memanfaatkan air

Berikut karakteristik dari beberapa pupuk hijau seperti yang ditampilkan pada Tabel 7.2.

Tabel 7.2 Karakteristik dari beberapa pupuk hijau

Sumber Pupuk Hijau	Kadar air bahan	Kandungan Bahan Organik	Kondisi bebas air				Nitrogen	Jumlah Bahan segar untuk menghasilkan 10 g dalam kg (10 gm) bahan kering
			Kadar abu	Alkalinitas dari abu <sup>a</sup>	Kemasaman larut air			
<i>Legume</i>								
Kacang Kedelai	76.7	78.04	21.96	6.92	1.70	2.78	42.9	
Kacang Polong Kanada	80.7	88.85	11.15	7.80	4.02	3.65	50.5	
Semanggi Manis	72.5	92.16	7.84	5.27	2.90	3.12	36.3	
Alfalfa	65.8	91.37	8.63	7.82	2.13	2.76	29.2	
Semanggi Merah	61.6	92.75	7.25	5.63	0.28	1.94	26.0	
Vetch berbulu	66.4	93.04	6.96	3.27	1.91	2.84	29.8	
<i>Non-legume:</i>								
Gandum	75.2	89.36	10.64	6.00	0.19	3.56	40.2	
Sawi bunga	89.1	90.33	19.67	10.48	2.88	4.79	91.7	
Oat	83.2	88.46	11.54	5.35	8.15	3.08	59.5	
Jagung	87.9	91.29	8.71	4.70	5.92	2.72	91.7	
Gandum Hitam	56.1	95.40	4.60	1.27	3.07	1.33	22.7	
Rumput timothy	60.1	93.76	6.24	2.32	0.23	1.29	25.0	
Bengkok hitam (redtop)	60.2	93.99	6.01	1.60	0.42	1.07	25.1	
Sorrel	80.5	90.18	9.82	3.67	3.01	1.98	50.2	

(Sumber: White, 1918)

Beberapa penelitian telah dilakukan guna melihat kandungan dari beberapa tanaman yang dijadikan sumber pupuk hijau. Salah satunya adalah daun *Tithonia diversifolia* kering mengandung 3.5-4.0% N, 0.35-

0.38% P, 3.5-4.1% K, 0.59% Ca, dan 0.27% Mg sehingga hijauan *Tithonia diversifolia* berpotensi sebagai sumber hara N, P, K bagi tanaman (Hartatik, 2007). Kelebihan lain dari biomassa *Tithonia diversifolia* adalah mempunyai kadar unsur K lebih tinggi daripada *Centrosema pubescens* dan *Calopogonium mucunoides*. Percobaan yang dilakukan oleh Barus (2005) menunjukkan bahwa daun *Calopogonium mucunoides* mengandung 2.47% N, 0.23% P, 0.75% K sedangkan daun *Centrosema pubescens* mengandung 3.49%, 0.36% P, 1.05% K. Hasil percobaan Kurniansyah (2010) menunjukkan bahwa kandungan daun *Tithonia diversifolia* adalah 3.06% N, 0.25% P, dan 5.75% K dan menyebabkan intensitas serangan hama dan patogen yang lebih rendah serta produksi kedelai yang lebih tinggi pada tanaman yang mendapat *Tithonia diversifolia* dibandingkan yang mendapat *Centrosema pubescens*. Percobaan ini juga memperlihatkan bahwa, dengan jumlah yang sama, waktu yang dibutuhkan untuk dekomposisi tajak tithonia lebih singkat daripada untuk *Centrosema pubescens* (Desyrakhmawati *et al.*, 2015).

Turi mini akan memberikan kontribusi yang besar terhadap ketersediaan hara dalam tanah yang ditunjukkan dengan hasil analisis kandungan hara, yaitu mengandung C organik 27,53% dan lebih tinggi daripada *C. juncea* yang mengandung 18,73% serta pupuk kandang sapi hanya 10,33%. Kandungan N total yang diberi turi mini 3,7%, yang diberi *C. juncea* 5,85% dan yang diberi pupuk kandang sapi mengandung 10,33%. Kandungan bahan organik turi mini 47,46%, *C. juncea* 32,29% dan pupuk kandang hanya 17,61%. Dengan kandungan hara seperti ini akan memberikan kontribusi hara pada masa tanam berikutnya (Kurniati, 2020).

### **7.1.3. Peranan dan Aplikasi Pupuk Hijau**

Pupuk hijau yang berasal dari tanaman memiliki kemampuan untuk memperbaiki sifat fisika, kimia, dan biologi tanah, selain itu pupuk hijau organik yang diberikan pada lahan pertanian tidak memiliki dampak negatif artinya tidak meninggalkan residu seperti pada pemupukan bahan kimia atau pupuk anorganik. Pupuk hijau yang diaplikasikan pada lahan pertanian akan membantu lingkungan mempertahankan siklus ekologi menjadi baik (Dahlianah, 2014).

Pengaplikasian pupuk hijau pada tanah masam telah banyak dilakukan. Pengaplikasian pupuk hijau umumnya dilakukan dengan mencacah daun dari sumber pupuk hijau yang kemudian disebar di atas tanah secara merata. Kemudian ditutup dengan tanah dan diinkubasi selama satu hingga dua minggu. Setelah itu baru tanah ditanami dengan tanaman yang hendak dibudidayakan.



Gambar 7.3 Pengaplikasian pupuk hijau tithonia pada tanah  
(Foto Herviyanti, 2023)

Zahrah (2009) melakukan penelitian menggunakan 7 jenis pupuk hijau yaitu *Caliandra tetragona*, *Flemingia congesta*, *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Leucaena glauca*, *Sesbania rostrata* dan *Sesbania sesban*, untuk menentukan jenis pupuk hijau penambat N udara terbanyak pada tanah masam yang dikapur dan tanpa dikapur. Persentase dan jumlah N yang ditambat dari udara pada tiap kali pemangkasan disajikan pada Tabel 7.3 dan jumlah penambatan pada Tabel 7.4.

Tabel 7.3 Persentase N yang ditambat dari udara setiap pemangkasan

Jenis Tanaman	Tanpa Kapur			Dikapur 1x Al-dd			Persentase Peningkatan
<b>Pemangkasan I (90 HST)</b>							
<i>Caliandra tetragona</i>	3.77	c	A	24.99	c	B	563
<i>Flemingia congesta</i>	17.78	ab	A	27.95	bc	A	57
<i>Gliricidia sepium</i>	35.55	ab	A	62.44	a	B	76
<i>Leucaena leucocephala</i>	15.56	b	A	25.56	c	A	64
<i>Leucaena glauca</i>	42.67	a	A	46.66	abc	A	10
<i>Sesbania rostrata</i>	39.59	ab	A	52.86	ab	A	34
<i>Sesbania sesban</i>	21.19	ab	A	35.00	bc	A	65
<b>Pemangkasan II (135 HST)</b>							
<i>Caliandra tetragona</i>	37.00	c	A	53.41	bc	B	44
<i>Flemingia congesta</i>	45.86	bc	A	53.40	bc	B	16
<i>Gliricidia sepium</i>	37.51	c	A	43.15	c	A	15
<i>Leucaena leucocephala</i>	41.28	c	A	62.54	b	B	52
<i>Leucaena glauca</i>	42.32	bc	A	54.58	b	B	29
<i>Sesbania rostrata</i>	74.07	a	A	80.64	a	A	9
<i>Sesbania sesban</i>	52.97	b	A	61.20	b	B	16
<b>Pemangkasan III (180 HST)</b>							
<i>Caliandra tetragona</i>	51.01	b	A	60.30	c	B	18
<i>Flemingia congesta</i>	70.54	a	A	76.27	ab	A	8
<i>Gliricidia sepium</i>	41.17	b	A	67.74	bc	B	65
<i>Leucaena leucocephala</i>	70.09	a	A	71.95	ab	A	3
<i>Leucaena glauca</i>	67.40	a	A	74.50	ab	A	10
<i>Sesbania rostrata</i>	71.36	a	A	82.17	a	B	15
<i>Sesbania sesban</i>	27.57	c	A	66.58	bc	B	141
<b>Pemangkasan IV (225 HST)</b>							
<i>Caliandra tetragona</i>	52.90	d	A	63.98	b	B	21
<i>Flemingia congesta</i>	79.29	a	A	81.65	a	B	3
<i>Gliricidia sepium</i>	44.18	e	A	79.02	a	B	79
<i>Leucaena leucocephala</i>	78.14	a	A	79.37	a	A	2
<i>Leucaena glauca</i>	69.22	b	A	78.87	a	B	14
<i>Sesbania sesban</i>	65.15	c	A	66.17	b	A	2

Tabel 7.4 Jumlah (mg/pot) penambahan N dari udara beberapa jenis tanaman setiap pemangkasan

Jenis Tanaman	Tanpa Kapur			Dikapur 1x Al-dd			Persentase Peningkatan
Pemangkasan I (90 HST)							
<i>Caliandra tetragona</i>	15.43	B	A	156.73	bc	B	916
<i>Flemingia congesta</i>	98.57	ab	A	216.12	bc	B	119
<i>Gliricidia sepium</i>	83.96	ab	A	133.07	c	A	58
<i>Leucaena leucocephala</i>	75.78	ab	A	183.39	bc	B	142
<i>Leucaena glauca</i>	139.93	ab	A	182.94	bc	A	31
<i>Sesbania rostrata</i>	177.49	A	A	311.23	ab	B	75
<i>Sesbania sesban</i>	169.89	A	A	383.41	a	B	126
Pemangkasan II (135 HST)							
<i>Caliandra tetragona</i>	116.69	d	A	281.71	cd	B	141
<i>Flemingia congesta</i>	215.63	bc	A	308.67	bc	B	43
<i>Gliricidia sepium</i>	119.84	d	A	224.67	d	B	87
<i>Leucaena leucocephala</i>	181.66	bcd	A	324.62	bc	B	79
<i>Leucaena glauca</i>	134.16	cd	A	280.92	cd	B	109
<i>Sesbania rostrata</i>	297.14	a	A	537.62	a	B	81
<i>Sesbania sesban</i>	249.71	ab	A	378.08	b	B	51
Pemangkasan III (180 HST)							
<i>Caliandra tetragona</i>	70.78	bc	A	253.07	bc	B	257
<i>Flemingia congesta</i>	296.73	a	A	344.32	a	A	16
<i>Gliricidia sepium</i>	165.69	a	A	334.80	ab	B	102
<i>Leucaena leucocephala</i>	140.16	b	A	334.64	ab	B	139
<i>Leucaena glauca</i>	233.99	a	A	335.65	ab	B	18
<i>Sesbania rostrata</i>	28.98	c	A	140.70	c	B	386
<i>Sesbania sesban</i>	35.22	c	A	197.35	c	B	460
Pemangkasan IV (225 HST)							
<i>Caliandra tetragona</i>	190.19	b	A	309.62	b	B	63
<i>Flemingia congesta</i>	621.37	a	A	694.04	a	A	12
<i>Gliricidia sepium</i>	260.35	b	A	683.01	a	B	162
<i>Leucaena leucocephala</i>	538.84	a	A	806.42	a	B	50
<i>Leucaena glauca</i>	502.28	a	A	661.33	a	B	32
<i>Sesbania sesban</i>	199.38	b	A	305.59	b	A	53

Sumber: Zahrah, 2009

Zahrah (2009) menyimpulkan bahwa *Sesbania rostrata* menghasilkan nilai penambatan N udara tertinggi yaitu sebesar 61.68% dengan jumlah penambatan N udara 503.60 mg/pot pada tanah masam, sedangkan pada tanah masam yang dikapur adalah sebanyak 71.89% dengan jumlah penambatan N udara sebanyak 989.54 mg/pot tetapi tanaman ini mati setelah 3x pemangkasan, di mana diduga tanaman ini tidak tahan pemangkasan. Selanjutnya untuk nilai peningkatan total penambatan N tertinggi akibat pengapuran terdapat pada *Caliandra tetragona* yaitu sebesar 154.66%, diikuti oleh *Gliseria sepium* 118.38%, *Sesbania sesban* 93.15%, *Leucaena leucocephala* 76.10%, *Leucaena glauca* 44.58%, dan *Flemingia congesta* 26.85%. Tanaman yang paling toleran terhadap tanah masam dan tahan pemangkasan adalah *Flemingia congesta* karena menghasilkan jumlah penambatan yang cukup tinggi dan tidak menunjukkan perbedaan hasil yang nyata antara perlakuan tanpa kapur dengan yang dikapur 1xAl-dd khususnya pada pemangkasan ke III dan IV.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Hakim dan Agustian (2003, 2004, dan 2005), di mana ditemukan bahwa gulma tithonia yang mampu dan tahan hidup tumbuh pada sembarang tanah, ternyata dapat dibudidayakan sebagai pupuk hijau penghasil pupuk alternatif (unsur hara dan bahan organik). Tithonia mampu memperbaiki kesuburan tanah masam berupa penurunan kandungan dan kejenuhan Al tanah, serta peningkatan pH dan kadar hara tanah, terutama N dan K (Hakim *et al.*, 2003 dalam Hakim *et al.*, 2007). Penurunan kandungan Al-dd tanah akibat pemberian tithonia dapat disebabkan oleh reaksi khelat antara asam-asam organik yang dihasilkan pelapukan tithonia dengan ion Al, atau pembentukan senyawa kompleks logam organik, sehingga Al tidak lagi larut. Ketika kelarutan Al berkurang, maka reaksi hidrolisis Al yang biasanya menyumbangkan ion H ke larutan tanah juga berkurang, sehingga pH tanah akan naik (Hakim, 1982; 1984; Hakim dan Helal, 1999; 2000 dalam Hakim *et al.*, 2007).

Hakim *et al.* (2006) menemukan efek penambahan tithonia yang beragam dari 6(C dan D), 12(E dan F) sampai 24 ton/ha (G dan H) yang menonjol pada musim tanam III di Ultisol adalah dalam bentuk peningkatan N dan K tanah. Dibandingkan perlakuan A dan B yang tidak ditambah tithonia dengan kadar N rata-rata 0,21%, penambahan tithonia

tersebut dapat meningkatkan kadar N total sekitar 0,04 sampai 0,10%. Kadar K-dd pada perlakuan A dan B rata-rata sekitar 0,3 me/100 g. Bila dibandingkan dengan perlakuan A dan B, penambahan tithonia 6-24 t/ha dapat meningkatkan K-dd sekitar 0,3-0,4 me/100 g (117-156 kgK/ha). Hal itu dapat disebabkan pelarutan K mineral oleh asam-asam organik yang dihasilkan pelapukan tithonia. Selain itu juga terdapat peningkatan kandungan C-organik sebesar 0.05-1.53% setelah pemberian pupuk hijau tithonia sebanyak 6-24 t/ha seperti yang ditampilkan pada Tabel 7.5.

Tabel 7.5 Sifat kimia Ultisol yang dipengaruhi efek sisa tithonia dan pupuk 2 musim tanam serta tambahan tithonia dan kapur sebelum musim tanam III

Dosis tithonia segar (t/ha)	Ciri Kimia tanah											
	pH H <sub>2</sub> O	C	N	C/N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	KTK efektif	Kej Al
	unit	%			ppm	me/100 g						%
	Contoh tanah awal sebelum musim tanam I											
	5.01	2.02	0.21	9.6	5	0.34	1.18	0.69	0.99	1.2	4.4	20
	Setelah diberi perlakuan											
<b>B1</b> lama 12t+0t	5.48	2.20	0.10	22	9	0.52	2.22	1.41	0.6			12
<b>A=0t</b>	<b>5.45</b>	<b>1.34</b>	<b>0.15</b>	<b>8.9</b>	<b>29</b>	<b>0.39</b>	<b>5.40</b>	<b>0.86</b>	<b>1.47</b>	<b>tu</b>	<b>8.12</b>	<b>tu</b>
<b>B2</b> lama 24t+0t	5.64	2.20	0.12	18.3	7	0.54	2.96	1.38	tu			tu
<b>B=0t</b>	<b>6.12</b>	<b>1.34</b>	<b>0.28</b>	<b>4.8</b>	<b>29</b>	<b>0.36</b>	<b>5.58</b>	<b>0.92</b>	<b>0.91</b>	<b>tu</b>	<b>7.77</b>	<b>tu</b>
<b>B1</b> lama 12t+24t	5.65	4.30	0.15	28.7	12	0.97	2.36	1.47	tu			tu
<b>C=6t</b>	<b>5.64</b>	<b>2.09</b>	<b>0.26</b>	<b>8</b>	<b>31</b>	<b>0.55</b>	<b>5.71</b>	<b>0.85</b>	<b>1.12</b>	<b>tu</b>	<b>8.23</b>	<b>tu</b>
<b>B2</b> lama 24t+12t	5.33	4.10	0.18	22.8	10	0.94	2.15	1.46	tu			tu
<b>D=6t</b>	<b>5.88</b>	<b>1.39</b>	<b>0.29</b>	<b>4.8</b>	<b>2.9</b>	<b>0.67</b>	<b>5.34</b>	<b>0.86</b>	<b>1.43</b>	<b>tu</b>	<b>8.30</b>	<b>tu</b>
<b>B1</b> lama 12t+24t	5.59	4	0.13	30.8	9	0.93	2.30	1.47	tu			tu
<b>E=12t</b>	<b>5.66</b>	<b>1.80</b>	<b>0.30</b>	<b>9</b>	<b>30</b>	<b>0.69</b>	<b>5.37</b>	<b>0.89</b>	<b>1.39</b>	<b>tu</b>	<b>8.34</b>	<b>tu</b>
<b>B2</b> lama 24t+12t	5.38	4.10	0.16	25.6	10	0.92	2.16	1.41	tu			tu
<b>F=12t</b>	<b>5.46</b>	<b>1.80</b>	<b>0.20</b>	<b>9</b>	<b>30</b>	<b>0.65</b>	<b>5.17</b>	<b>0.82</b>	<b>1.86</b>	<b>tu</b>	<b>8.50</b>	<b>tu</b>
<b>B1</b> lama 12t+0	5.42	2.50	0.10	25	9	0.52	2.60	1.37	0.8			15
<b>G=24t</b>	<b>5.61</b>	<b>2.87</b>	<b>0.34</b>	<b>8.4</b>	<b>31</b>	<b>0.75</b>	<b>5.54</b>	<b>0.86</b>	<b>1.27</b>	<b>tu</b>	<b>8.42</b>	<b>tu</b>
<b>B2</b> lama 24t+0	5.66	2.70	0.12	22.5	8	0.52	2.21	1.35	tu			tu
<b>H=24t</b>	<b>5.58</b>	<b>1.79</b>	<b>0.32</b>	<b>5.6</b>	<b>30</b>	<b>0.76</b>	<b>5.84</b>	<b>0.83</b>	<b>1.56</b>	<b>tu</b>	<b>8.99</b>	<b>tu</b>

Catatan: B1 = diberi tithonia segar 12t/ha, B2 = diberi tithonia segar 24t/ha sebelum musim tanam I. Sebelum musim tanam III, diberi tambahan tithonia seperti perlakuan A sampai H. Angka pada baris yang bercetak tebal adalah sifat kimia tanah sebelum musim tanam III, sedangkan yang di atasnya adalah sebelum musim tanam II.

Sumber: Hakim *et al.* (2006).

Tanaman pupuk hijau juga dapat digunakan sebagai tanaman rotasi. Qaswar *et al.* (2019) melakukan penelitian dengan penanaman tanaman sumber pupuk hijau pada lahan padi dengan tipe tanah *Ferralsic Cambisol* yang dilakukan selama 34 tahun (1982-2016). Perlakuan rotasinya adalah 1) Padi-Padi-Bera pada musim dingin (sebagai kontrol) (R-R-F), 2) Padi-Padi-Milkvetch China (*Astragalus sinicus* L.), (R-R-M) 3) Padi-Padi-Rapa (*Brassica napus* L.) (R-R-R), 4) Padi-Padi-Rumput Italian Ryegrass (*Lolium multiflorum*) (R-R-G). Penyemaian dari tanaman pupuk hijau ini dilakukan pada setiap bulan Oktober, setelah Padi pertama dipanen dan ditanam ke tanah, sebelum padi baru dipindahkan. Tidak ada pemberian pupuk buatan pada tanaman pupuk hijau selama musim dingin. Biomassa segar dari gabungan ryegrass, milkvetch, dan rapeseed adalah 5700 kg/ha, 6000 kg/ha, dan 6200 kg/ha, sedangkan bahan keringnya 1126 kg/ha, 1276 kg/ha, dan 1249 kg/ha. Milkvetch mengandung 43,7% C dan 3,9% N, ryegrass mengandung 41,5% C dan 1,8% N, rapeseed mengandung 42,3% C dan 1,76% N konten dalam sampel yang dikumpulkan pada tahun 2017. Interaksi dari perlakuan dan lama tahunnya memberikan dampak yang signifikan terhadap sifat tanah. Berikut efek jangka panjang dari tanaman pupuk hijau sebagai tanaman rotasi pada pH tanah, bahan organik tanah, total N dan total P pada tanah sawah masam (Tabel 7.6).

Tabel 7.6 Efek jangka panjang dari rotasi pupuk hijau pada pH tanah, bahan organik tanah dan P total pada tanah sawah masam

Tahun	Perlakuan	pH	Bahan Organik Tanah (g/kg)	N-Total	P-Total
Tanah Awal		6.1	20.4	0.94	0.65
1983-1990	R-R-F	6.04 ± 0.06 bc	21.9 ± 0.34 c	1.07 ± 0.03 c	0.69 ± 0.01 b
	R-R-M	5.98 ± 0.07 c	25.1 ± 0.29 a	1.24 ± 0.03 a	0.70 ± 0.02 b
	R-R-G	6.07 ± 0.07 ab	22.9 ± 0.84 b	1.22 ± 0.02 a	0.74 ± 0.02 a

Tahun	Perlakuan	pH	Bahan Organik Tanah (g/kg)	N-Total	P-Total
1991-2000	R-R-R	6.13 ± 0.01 a	23.0 ± 0.57 b	1.15 ± 0.01 b	0.70 ± 0.02 b
	R-R-F	5.45 ± 0.03 c	22.7 ± 0.45 c	1.13 ± 1.01 d	0.90 ± 0.02 b
	R-R-M	5.70 ± 0.13 a	24.5 ± 0.44 a	1.39 ± 0.02 a	0.91 ± 0.02 b
	R-R-G	5.57 ± 0.04 b	23.6 ± 0.51 b	1.21 ± 0.02 c	0.89 ± 0.04 b
2001-2016	R-R-R	5.80 ± 0.04 a	23.8 ± 0.35 b	1.31 ± 0.02 b	0.96 ± 0.04 a
	R-R-F	5.78 ± 0.05 ns	27.3 ± 0.52 c	1.67 ± 0.03 c	1.11 ± 0.03 b
	R-R-M	5.83 ± 0.08	28.7 ± 0.34 a	1.84 ± 0.09 a	1.13 ± 0.08 b
	R-R-G	5.77 ± 0.04	27.9 ± 0.50 a	1.75 ± 0.03 b	1.26 ± 0.08 a
	R-R-R	5.87 ± 0.08	28.8 ± 0.43 b	1.74 ± 0.04 b	1.22 ± 0.07 a

Sumber: Qaswar *et al.* (2019)

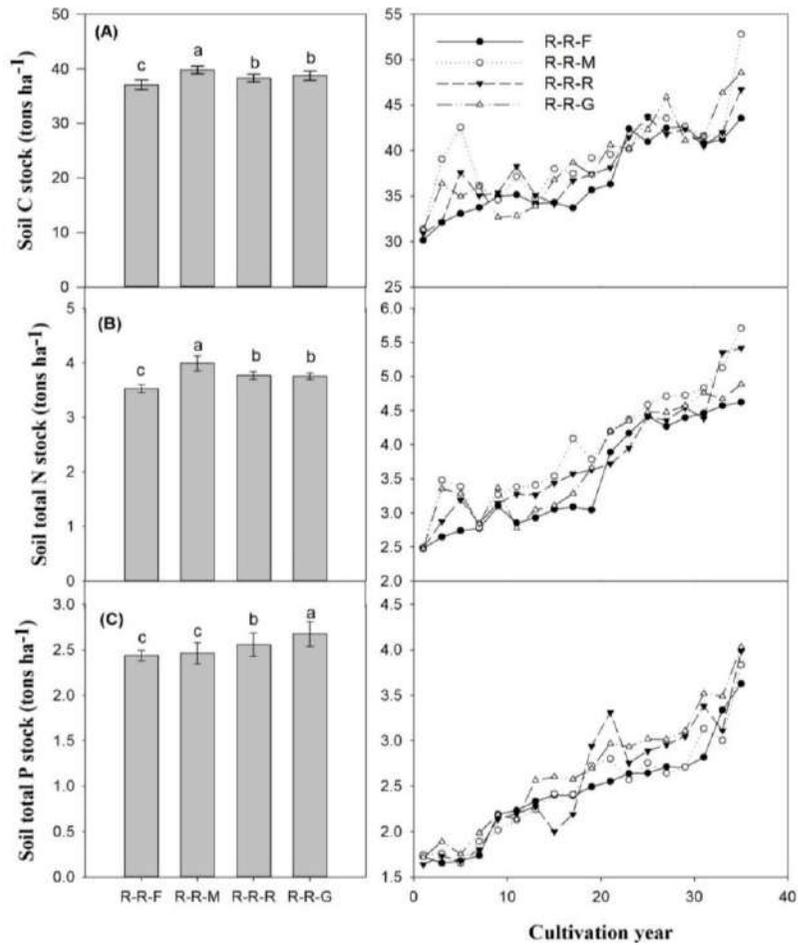
Interaksi dari tahun dan perlakuan secara signifikan berpengaruh terhadap sifat tanah (Tabel 7.6). Selama periode 1983-1990, pH dari R-R-G dan R-R-R tidak berbeda signifikan. pH terendah terdapat pada R-R-M. pH dari R-R-F dan R-R-M mengalami penurunan sebesar 0.98% dan 2% daripada pH tanah awal. Selama periode 1991-2000, pH tanah dari semua perlakuan mengalami penurunan dari periode sebelumnya dan yang tertinggi terdapat pada R-R-R.

Kandungan bahan organik tanah pada semua perlakuan ditemukan lebih tinggi daripada tanah awal. Dibandingkan dengan tanah awal, peningkatan kandungan bahan organik tanah pada R-R-F, R-R-M, R-R-G, dan R-R-R masing-masingnya adalah 7.3%, 23%, 12.2%, 12.7% (selama periode 1983-1990) dan 11.3%, 20%, 15.6%, 16.6% (selama periode 1991-2000). Kemudian untuk periode 2001-2016, peningkatan kandungan bahan organik tanah dari R-R-F, R-R-M, R-R-G, dan R-R-R masing-masingnya adalah 33.8%, 40.6%, 36.7%, dan 41.2%.

Kandungan N-Total tanah pada semua perlakuan lebih tinggi pada semua periode pemupukan dibandingkan dengan kandungan N-total tanah awal. Dibandingkan dengan perlakuan R-R-F, peningkatan kandungan N-total tanah di bawah perlakuan R-R-M, R-R-G, dan R-R-R masing-masing adalah 15,9%, 14%, dan 7,5%, selama periode 1983-1990, sebesar 23%, 7,0%, dan 16%, masing-masing, selama 1991-2000, dan masing-masing sebesar 9,8%, 4,6%, dan 3,9%, selama 2001-2016.

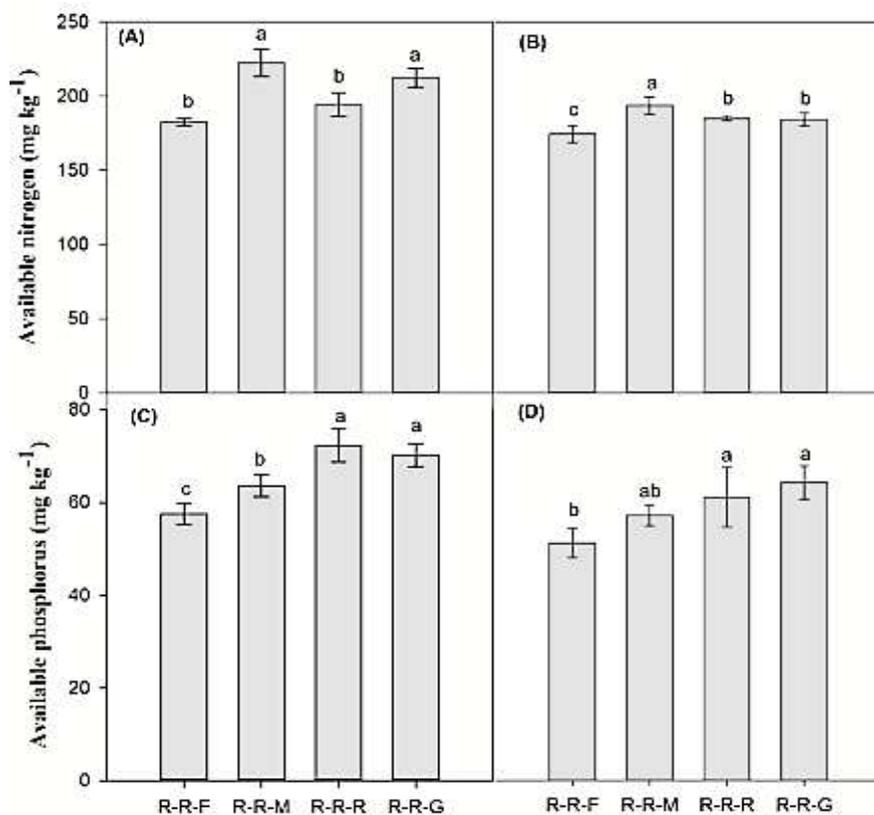
Kelimpahan relatif rhizobia di tanah dengan pupuk hijau jangka panjang dalam rotasi dengan padi lebih tinggi daripada perlakuan bera musim dingin berdasarkan percobaan lapangan jangka panjang, yang

menunjukkan bahwa aplikasi pupuk hijau jangka panjang dapat meningkatkan secara signifikan kandungan nitrogen total di sawah. Zhu *et al.* (2018) mempelajari proses pelepasan nitrogen dari pupuk hijau berlabel 15N (*Chinese milk vetch*) selama pertumbuhan padi dua musim dan menemukan bahwa sekitar 39-46% N pupuk hijau diserap oleh beras, dan sekitar 29-33% tetap berada di dalam tanah setelah 177 hari pemberian pupuk hijau.



Gambar 7.4 Efek jangka panjang dari rotasi pupuk hijau yang berbeda terhadap *stock* dari C-Organik Tanah (A) N-Total (B) dan P-total pada Tanah Sawah Masam

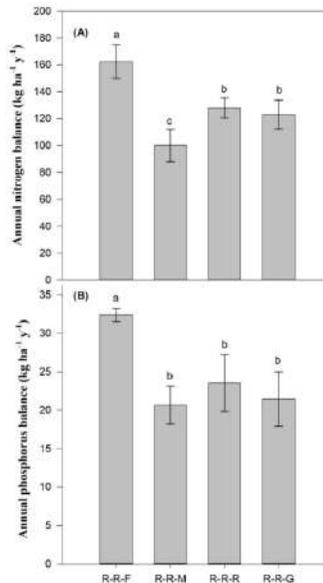
Selama bertahun-tahun, kandungan P-Total tanah meningkat di semua perlakuan dibandingkan dengan kandungan P-Total tanah awal. Kandungan P-Total tanah dalam perlakuan R-R-F, R-R-M, R-R-G, dan R-R-R masing-masing meningkat sebesar 6%, 7,7%, 12%, dan 7,7% selama 1983-1990. Selama 1991-2000, kandungan P-Total tertinggi di bawah perlakuan R-R-R dan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antara perlakuan R-R-F, R-R-M, dan R-R-G. Selama tahun 2001-2016, kandungan P-Total tanah juga tidak menunjukkan perbedaan yang nyata antara perlakuan R-R-F dan R-R-M atau antara perlakuan R-R-G dan R-R-R.



Gambar 7.5 Pengaruh jangka panjang dari rotasi pupuk hijau pada N tersedia tanah dan P tersedia tanah setelah padi awal (A,C) dan akhir (B,D)

Setelah 34 tahun tanam, peningkatan N-Tersedia di bawah R-R-M, R-R-R dan R-R-G dibandingkan dengan R-R-F masing-masing adalah 22%, 6,4%, dan 16,5%, pada padi awal dan 11%, 6%, dan 5,6%, masing-masing pada padi akhir. beras (Gambar 7.5). Demikian pula, dibandingkan dengan R-R-F, peningkatan P-Tersedia pada R-R-M, R-R-R, dan R-R-G masing-masing adalah 10,5%, 25,7%, dan 22%, saat padi awal dan 11,7%, 19,3%, dan 25,5%, masing-masing, pada akhir padi.

Rotasi pupuk hijau secara signifikan memengaruhi keseimbangan N dan P tahunan yang jelas dalam percobaan jangka panjang pada sistem tanam padi ganda (Gambar 7.6). Pada perlakuan kontrol (R-R-F), keseimbangan N dan P secara jelas paling tinggi dibandingkan dengan semua perlakuan pupuk hijau lainnya. Keseimbangan N tahunan dalam perlakuan R-R-M, R-R-R dan R-R-R menurun masing-masing sebesar 38%, 21%, dan 24%, dan keseimbangan P tahunan menurun masing-masing sebesar 36%, 27%, dan 34%, dibandingkan dengan R-R-F dalam sistem tanam padi ganda.



Gambar 7.6 Efek jangka panjang dari rotasi pupuk hijau yang berbeda terhadap keseimbangan (A) N dan P (B) tahunan pada tanah sawah masam

Kesuburan tanah merupakan salah satu indikator utama untuk mengukur keberlanjutan sistem tanam. Hasil Qaswar *et al.* (2019) menunjukkan bahwa pupuk hijau meningkatkan kandungan nutrisi dan stok dibandingkan dengan yang berada di bawah perlakuan bera musim dingin, dan peningkatan tertinggi dalam kandungan N yang tersedia berada di bawah perlakuan R-R-M (Gambar 7.5). Tanaman penutup tanah non-polongan mengurangi pencucian nutrisi dan meningkatkan ketersediaan nutrisi (Doltra *et al.*, 2019). Tanaman penutup tanah polongan meningkatkan ketersediaan N dan karenanya meningkatkan hasil panen dengan meningkatkan efisiensi penggunaan N (Zhao *et al.*, 2015). Kemampuan kacang-kacangan untuk memperbaiki molekul dinitrogen atmosfer menjadi mineral N untuk penyerapan tanaman menjadikan pupuk hijau jenis kacang-kacangan yang paling efisien (Thorup-Kristensen *et al.*, 2003). Tren penurunan pH tanah bisa disebabkan oleh pemupukan sintesis jangka panjang (Xie *et al.*, 2016). Lin *et al.* (2014) juga mengamati tren penurunan pH tanah di tanah sawah di bawah pemupukan jangka panjang. Banyak penelitian mengamati pengasaman tanah yang disebabkan oleh pemupukan anorganik jangka panjang. Selain itu, tanaman melepaskan ion  $H^+$  bersih; di sisi lain, ketika penyerapan anion melebihi serapan kation, mereka melepaskan kelebihan bersih  $OH^-$  atau  $HCO_3^-$  (Tang *et al.*, 2011). Juga diamati dalam penelitian sebelumnya bahwa pemupukan N menggeser tanah ke tahap penyangga  $Al^{3+}$ . Al dilepaskan dalam larutan tanah dari permukaan mineral lempung selama proses hidrolisis Al hidroksida pada pH tanah yang relatif rendah, yang juga dapat menurunkan jumlah kation basa dan meningkatkan keasaman tanah (Stevens *et al.*, 2009). Namun, sifat basa pupuk hijau menetralkan proton di tanah asam dan membantu meningkatkan pH tanah (Rukhsana *et al.*, 2013). Pupuk hijau juga dapat membantu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah dengan meningkatkan porositas tanah (Kumar *et al.*, 2014, Srinivasarao *et al.*, 2014) dan struktur, mengurangi pencucian (Thorup-Kristensen *et al.*, 2012) dan meningkatkan kapasitas menahan air (Yang *et al.*, 2012, Fließbach *et al.*, 2007), sehingga memberikan kondisi yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman yang tepat untuk mempertahankan hasil panen jangka panjang.

## 7.2. Pupuk Kandang

### 7.2.1. Sumber dan Karakteristik Pupuk Kandang

Pupuk Kandang adalah semua sisa ternak baik dalam bentuk segar ataupun bercampur dengan urine atau terdekomposisi dalam bentuk padat maupun cairan, bisa berasal dari kotoran sapi, kambing, kuda, unggas dan babi. Kualitas pupuk kandang sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis dan umur hewan, jenis makanannya, alas kandang, dan penyimpanan atau pengelolaan. Kandungan unsur-unsur hara di dalam pukan tidak hanya tergantung dari jenis ternak, tetapi juga tergantung dari makanan dan air yang diberikan, umur dan bentuk fisik dari ternak.

Pada Tabel 7.7 dapat dilihat bahwa pupuk kandang ayam broiler mempunyai kadar hara P yang relatif lebih tinggi dari pupuk kandang lainnya. Kadar hara ini sangat dipengaruhi oleh jenis konsentrat yang diberikan. Selain itu pula dalam kotoran ayam tersebut tercampur sisa-sisa makanan ayam serta sekam sebagai alas kandang yang dapat menyumbangkan tambahan hara ke dalam pukan terhadap sayuran. Pukan ayam relatif lebih cepat terdekomposisi serta mempunyai kadar hara yang cukup pula jika dibandingkan dengan jumlah unit yang sama dengan pukan lainnya (Widowati *et al.*, 2005). Sedangkan untuk pupuk kandang sapi memiliki kadar serat yang tinggi seperti selulosa dengan hasil C/N rasio yang cukup tinggi, >40. Selain itu pupuk kandang sapi juga memiliki kadar air yang tinggi sehingga disebut sebagai pupuk dingin. Kemudian untuk pupuk kandang kambing memiliki tekstur yang khas karena berbentuk butiran-butiran yang agak sukar dipecah secara fisik yang akan berpengaruh terhadap proses dekomposisi dan proses penyediaan haranya. Nilai rasio C/N pukan kambing umumnya masih di atas 30. Kadar hara pukan kambing mengandung kalium yang relatif lebih tinggi dari pupuk kandang lainnya (Hartatik dan Widowati, 2006).

Tabel 7.7 Beberapa kandungan hara dalam bahan segar pupuk kandang

Sumber pupuk kandang	Kadar air	Bahan Organik	%					Rasio C/N
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO		
Sapi	80	16	0.3	0.2	0.15	0.2	20-25	
Kerbau	81	12.7	0.25	0.18	0.17	0.4	25-28	
Kambing	64	31	0.7	0.4	0.25	0.4	20-25	

Sumber pupuk kandang	Kadar air	Bahan Organik	%					Rasio C/N
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO		
Ayam	57	29	1.5	1.3	0.8	4	9-11	
Babi	78	17	0.5	0.4	0.4	0.07	19-20	
Kuda	73	22	0.5	0.25	0.3	0.2	24	

Sumber: Lingga (1991) dalam Hartatik dan Widowati (2006)

Pupuk kandang kambing merupakan pupuk kandang yang berasal dari kotoran yang dihasilkan oleh kambing, tekstur kotoran kambing sangat khas, karena berbentuk butiran-butiran yang sukar dipecah secara fisik sehingga berpengaruh terhadap proses dekomposisi dan proses penyediaan haranya, termasuk dalam pupuk panas, kadar air pupuk kandang kambing relatif lebih rendah dari pupuk kandang sapi dan sedikit lebih tinggi dari pupuk kandang ayam, pupuk kandang yang sudah matang memiliki tekstur gembur, tidak berbau dan bersuhu dingin (Glijo, 2015). Pupuk kandang kambing mengandung unsur N 0,7%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,4%; K<sub>2</sub>O 0,25%; CaO 0,4%; rasio C/N 20-25%; bahan organik 31% dan kadar air 64%

Perbedaan lokasi peternakan juga memengaruhi kandungan pupuk kandang yang dihasilkan. Hasil penelitian Melsasail *et al.* (2019) menunjukkan perbandingan beberapa kandungan unsur hara dari kotoran sapi di dataran rendah dan dataran tinggi di Sulawesi Utara. Kandungan C-Organik, tertinggi berada pada kotoran sapi yang berasal dari lokasi di dataran tinggi (Tomohon 1) sebesar 10,42%, Sedangkan nilai C-Organik terendah berada pada lokasi di Desa Kalasey 1 sebesar 8,69%. Untuk unsur nitrogen (N-total), nilai tertinggi diperoleh dari kotoran sapi di dataran rendah (Kalasey 1) yaitu sebesar 0,88% Sedangkan nilai N-Total terendah diperoleh pada daerah Tomohon 1 yaitu 0,68%. Untuk fosfor (P-total), nilai tertinggi diperoleh dari lahan Tomohon yaitu 0.34% dengan kriteria. Sedangkan nilai P-total terendah diperoleh dari lahan Kalasey yaitu 0.22%. Untuk unsur kalium (K<sub>2</sub>O) tertinggi diperoleh dari kotoran sapi di dataran rendah (Kalasey 1) yaitu 0,56%. Sedangkan nilai K<sub>2</sub>O terendah diperoleh dari lahan di Tomohon yaitu 0,36%. Selain itu, daerah dataran tinggi Tomohon memiliki kadar air tinggi karena lahannya merupakan area bekas persawahan.

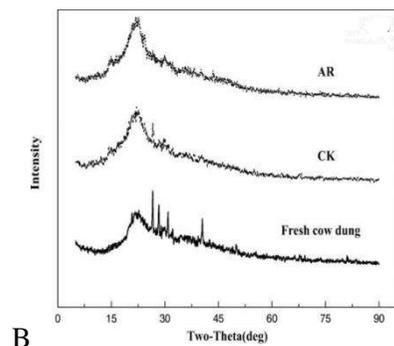


Gambar 7.7 SEM dari pupuk kandang babi (a), ayam (b) dan sapi (c) dengan perbesaran 10.00kV ((Sumber: Xu *et al.*, 2022)

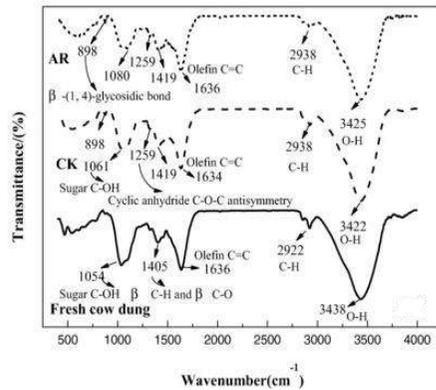
Morfologi permukaan dari pupuk kandang babi, ayam, dan sapi ditunjukkan pada Gambar 7.7 Terlihat tekstur pupuk kandang babi padat dan halus; Selain itu, dimensi partikelnya lebih kecil dibandingkan pupuk kandang ayam dan sapi. Pupuk kandang ayam memperlihatkan permukaan yang kompak dan kaku dengan tonjolan granular. Namun struktur permukaan pupuk kandang sapi berlubang dan retak dengan ukuran berbeda-beda, substratnya mungkin sisa-sisa tumbuhan yang belum tercerna oleh saluran pencernaan hewan.



A



B



C

Gambar 7.8 SEM (A), XRD (B), dan FTIR(C) dari pupuk kandang sapi (Cai *et al.*, 2019)

Analisis SEM dari pupuk kandang sapi dapat dilihat pada Gambar 7.8 A. Partikel pada pupuk kandang sapi lepas dan hampir terfragmentasi tanpa perekatan. Pada FTIR (Gambar 7.8 B) terdapat getaran ulur hidroksil antarmolekul dari O–H muncul pada 3500-3300  $\text{cm}^{-1}$ , dan puncak yang diamati sekitar 2900  $\text{cm}^{-1}$  disebabkan oleh vibrasi ulur C–H. Penyerapan karakteristik 1600  $\text{cm}^{-1}$  dianggap berasal dari vibrasi tekukan olefin C=C, yang mengindikasikan bahwa ketika struktur selulosa diubah, patahan rantai molekul selulosa dihancurkan sementara alkena terbentuk. Puncak teleskopik karbohidrat  $\beta$ C–H dan  $\beta$ C–O muncul pada 1475-1300  $\text{cm}^{-1}$ . Pada XRD (Gambar 7.8 C), memiliki *peak* utama dan sekunder pada 22.0° dan 18.0°, yang menampilkan intensitas difraksi kristal dan daerah amorf selulosa (Cai *et al.*, 2019).

### 7.2.2. Aplikasi Pupuk Kandang

Pupuk kandang adalah salah satu bahan organik yang berpotensi digunakan sebagai pembenah tanah yang dapat mengatasi permasalahan pada tanah masam. Pupuk ini sudah digunakan secara luas yang bisa meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman. Misalnya ketersediaan P dapat ditingkatkan dengan pupuk kandang ayam yang disebabkan oleh kandungan P yang tinggi pada pupuk tersebut. Namun, juga diduga bahwa kelarutan P dapat diinduksi oleh reaksi pertukaran antara anion organik dan P yang diserap pada permukaan tanah. Hue (1992 dalam O’Hallorans

*et al.*, 1997) menekankan pentingnya senyawa organik pada ketersediaan P, yang menunjukkan bahwa reaksi pertukaran ligan antara anion organik dan oksida Fe atau Al yang memblokir tempat penyerapan P dan mengurangi kelarutan Al dalam larutan melalui reaksi kompleksasi.

Produksi tanaman pada tanah masam dapat ditingkatkan secara signifikan dengan mengatur pH hingga mendekati netral. Meskipun kemasaman tanah biasanya diperbaiki dengan pengapuran, terdapat bukti bahwa penambahan pupuk kandang dapat meningkatkan pH tanah masam. Whalen *et al.* (2000) melakukan penelitian untuk menemukan pengaruh kotoran sapi terhadap kemasaman tanah dan ketersediaan unsur hara ditentukan di laboratorium untuk dua tanah masam dari Beaverlodge dan Fort Vermillion di wilayah Peace River di Alberta, Kanada. Pupuk kandang berpengaruh langsung terhadap pH tanah dan bertahan selama inkubasi 8 minggu. Tanah yang diberi pupuk kandang memiliki pH yang jauh lebih tinggi dibandingkan tanah yang tidak diperlakukan, dan peningkatan tertinggi pada perlakuan 40 g pupuk kandang/kg tanah, di mana meningkatkan pH tanah Beaverlodge dan Fort Vermillion masing-masing dari 4,8 menjadi 6,0 dan 5,5 menjadi 6,3. pH yang lebih tinggi pada tanah yang diberi pupuk kandang disebabkan oleh *buffering* dari bikarbonat ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) dan asam organik dalam pupuk kandang. Mineral N ( $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ ), P, K, Ca, dan Mg meningkat ketersediaannya segera setelah pemberian pupuk kandang. Tanah yang diperlakukan dengan 40 g pupuk kandang/kg tanah memiliki P dan K tersedia untuk tanaman tiga hingga empat kali lebih banyak dibandingkan tanah yang tidak diperlakukan, sedangkan konsentrasi S yang tersedia tidak berbeda secara signifikan. Al dan Fe yang dapat diekstraksi sedikit menurun setelah pemberian pupuk kandang, namun tidak signifikan perbedaannya, sementara kapasitas pertukaran kation (KTK) tanah tidak mengalami perubahan. Berarti dalam jangka pendek (inkubasi 8 minggu), Al, Fe, dan KTK dengan pemberian pupuk kandang tidak terjadi perubahan signifikan. Dapat disimpulkan bahwa dalam jangka pendek, penambahan pupuk kandang dapat meningkatkan pH dan kuantitas P dan K yang tersedia bagi tanaman di tanah masam.

Walida *et al.* (2020) melakukan penelitian mengenai pemberian pupuk kotoran ayam dalam upaya rehabilitasi Ultisol yang terdegradasi

dengan dosis yang didasarkan pada jumlah bahan organik yang terdapat dalam tanah sebanyak 3%, berupa:

1.  $K_0$  = Kontrol (tanpa perlakuan),
2.  $K_1$  = 1,5% (18,70 ton/ha),
3.  $K_2$  = 3,0% (27,40 ton/ha),
4.  $K_3$  = 4,5% (46,10 ton/ha),
5.  $K_4$  = 6,0% (60,80 ton/ha).

Sifat Kimia Tanah setelah pemberian pupuk kandang tersebut dapat dilihat pada Tabel 7.8.

Tabel 7.8 Sifat kimia tanah setelah pemberian pupuk kandang pada Ultisol terdegradasi

Perlakuan	Sifat kimia tanah					
	pH tanah	C(%)	N(%)	C/N	P(ppm)	KTK(me/100 g)
$K_0$	5.62 d	0.18 d	0.14 c	1.29 d	10.52 d	14.33 d
$K_1$	5.68 c	0.24 c	0.16 b	1.50 c	12.22 c	14.25 c
$K_2$	5.83 bc	0.36 bc	0.18 ab	2.00 b	12.78 bc	18.32 bc
$K_3$	6.04 b	0.42 b	0.20 a	2.10 bc	13.42 b	18.38 b
$K_4$	6.08 a	0.98 a	0.22 a	4.45 a	15.68 a	19.91 a

Sumber: Walida *et al.* (2020)

Berdasarkan Tabel 7.8 didapatkan bahwa perlakuan dosis pupuk kandang ayam 6% (60,80 ton/ha) merupakan perlakuan terbaik dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya dalam meningkatkan pH tanah, P-tersedia dan KTK masing-masing sebesar 6,08; 15,68 ppm; dan 19,91 me/100 g atau mengalami peningkatan masing-masing sebesar 5,30%; 79,69%; dan 72,38% dibandingkan kontrol. Pemberian bahan organik kotoran ayam  $K_3$  sampai  $K_4$  (4,5-6%) merupakan perlakuan terbaik dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya dalam meningkatkan C-organik dan N-total masing-masing sebesar 0,98-0,42% dan 0,22-0,20%. Pemberian bahan organik kotoran ayam  $K_4$  (4,5%) merupakan perlakuan terbaik dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya dalam meningkatkan C/N tanah sebesar 6,10 atau mengalami peningkatan sebesar 44,89% dibandingkan kontrol ( $K_0$ ).

Aplikasi pupuk kandang dapat dikombinasikan dengan bahan organik lainnya seperti pupuk hijau, kompos, abu ampas tebu, dan biochar.

Bidai *et al.* (2020) melakukan penelitian dengan mengombinasikan pupuk kandang dengan abu ampas tebu pada pH tanah, P tersedia, dan kapasitas tukar kation (KTK) selama percobaan lapangan 2 musim di Kabupaten Kakamega, Kenya Barat. Penelitian menggunakan rancangan acak kelompok lengkap, dengan perlakuan  $3 \times 3$  faktorial, dan 3 ulangan. Faktor yang dimasukkan dalam penelitian ini adalah 2 faktor: pupuk kandang sapi dengan takaran 0, 5, dan 10 ton/ha dan abu ampas tebu dengan takaran 0 dan 5 ton/ha abu ampas tebu, dan 2 ton/ha kapur. Petak yang menerima kapur sebanyak 2 ton/ha dianggap sebagai kontrol positif, sedangkan petak yang tidak menerima perubahan apa pun dianggap sebagai kontrol negatif. Pemberian abu ampas tebu dan pupuk kandang sapi menunjukkan pengaruh yang sangat nyata terhadap sifat-sifat tanah pada  $P \leq 0,01$ . Kombinasi pemberian abu ampas tebu 5 ton/ha dengan 5 ton/ha pupuk kandang meningkatkan pH tanah sebesar 0.18, dan dengan 10 ton/ha pupuk kandang sebesar 0.17. Peningkatan ini lebih tinggi dibandingkan kontrol positif (2 ton/ha kapur saja), yang meningkatkan pH tanah sebesar 0.03, sedangkan kontrol negatif (tanpa perubahan) menurunkan pH tanah sebesar 0.01 pada akhir musim ke-2. P tersedia dalam tanah meningkat sebesar 6 ppm karena adanya 5 ton/ha kotoran sapi dan sebesar 4 ppm karena 5 ton/ha abu ampas tebu. KTK tanah meningkat karena tingginya tingkat pemberian pupuk kandang pada akhir musim kedua. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan abu ampas tebu dan pupuk kandang sapi meningkatkan pH tanah, P tersedia dan KTK.

Kabango *et al.* (2022) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh dari pemberian pupuk kandang ayam dan kapur pertanian dalam dosis rendah terhadap beberapa sifat tanah pada Ferrasols dari zona agroekologi Danau Victoria di Uganda pada dua daerah yaitu Masaka dan Mukono. Penelitian ini menggunakan *Split Plot* Faktorial dalam RAK dengan aplikasi kapur pertanian (0, 0.5, 1, 1.5, 2 ton/ha) sebagai petak utama dan pupuk kandang ayam (0, 1, 2, 3 ton/ha) sebagai anak petak, dan 3 ulangan. Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan kapur dalam dosis rendah dengan pupuk kandang ayam secara signifikan meningkatkan pH, KTK, P, N, K, Kejenuhan Basa dan Mn pada plot yang berada di daerah Mukono sedangkan di Masaka tidak signifikan dalam memperbaiki karakteristik kimia tanah.

Tabel 7.9 Pengaruh pemberian dosis berbeda dari kapur pertanian dan pupuk kandang ayam terhadap beberapa sifat tanah pada daerah Mukono

Parameter	$\Delta$ pH (unit)	$\Delta$ CEC (me/100 g)	$\Delta$ P (ppm)	$\Delta$ N (%)	$\Delta$ K (ppm)	$\Delta$ KB (%)	$\Delta$ Mn (ppm)	
Kapur Pertanian (ton/ha)								
0.0	-0.6600 <sup>a</sup>	3.607 <sup>bc</sup>	6.11 <sup>a</sup>	-0.011 <sup>a</sup>	6.8 <sup>a</sup>	-16.87 <sup>a</sup>	395.5 <sup>d</sup>	
0.5	-0.2612 <sup>b</sup>	4.617 <sup>c</sup>	5.74 <sup>a</sup>	-0.005 <sup>a</sup>	7.4 <sup>a</sup>	-6.76 <sup>b</sup>	363.2 <sup>c</sup>	
1.0	0.5350 <sup>c</sup>	2.909 <sup>b</sup>	33.14 <sup>b</sup>	0.028 <sup>b</sup>	135.2 <sup>b</sup>	14.63 <sup>c</sup>	334.8 <sup>b</sup>	
1.5	1.0700 <sup>d</sup>	-0.324 <sup>a</sup>	51.54 <sup>c</sup>	0.053 <sup>c</sup>	234.4 <sup>c</sup>	31.22 <sup>d</sup>	276.6 <sup>a</sup>	
2.0	1.3104 <sup>c</sup>	-0.253 <sup>a</sup>	52.66 <sup>c</sup>	0.055 <sup>c</sup>	222.6 <sup>c</sup>	35.81 <sup>e</sup>	275.0 <sup>a</sup>	
Pupuk Kandang (ton/ha)								
0.0	0.2383 <sup>a</sup>	2.785 <sup>b</sup>	27.1 <sup>ns</sup>	0.024 <sup>ns</sup>	106.7 <sup>a</sup>	7.37 <sup>a</sup>	334.9 <sup>ns</sup>	
1.0	0.2397 <sup>a</sup>	2.755 <sup>b</sup>	24.2 <sup>ns</sup>	0.017 <sup>ns</sup>	91.8 <sup>a</sup>	7.11 <sup>a</sup>	338.1 <sup>ns</sup>	
2.0	0.5033 <sup>b</sup>	1.408 <sup>a</sup>	31.5 <sup>ns</sup>	0.029 <sup>ns</sup>	135.8 <sup>b</sup>	14.63 <sup>b</sup>	318.3 <sup>ns</sup>	
3.0	0.6140 <sup>b</sup>	1.497 <sup>a</sup>	36.5 <sup>ns</sup>	0.026 <sup>ns</sup>	150.8 <sup>b</sup>	17.31 <sup>b</sup>	324.8 <sup>ns</sup>	
Kapur pertanian x Pupuk Kandang								
0.0	0.0	-0.7667 <sup>a</sup>	3.572 <sup>bc</sup>	5.33 <sup>a</sup>	-0.012 <sup>ab</sup>	12.1 <sup>a</sup>	-20.26 <sup>a</sup>	393.5 <sup>d</sup>
0.0	1.0	-0.7250 <sup>a</sup>	4.032 <sup>bcd</sup>	11.63 <sup>a</sup>	-0.003 <sup>b</sup>	7.7 <sup>a</sup>	-18.89 <sup>ab</sup>	401.5 <sup>d</sup>
0.0	2.0	-0.6567 <sup>ab</sup>	3.513 <sup>bc</sup>	4.78 <sup>a</sup>	-0.003 <sup>b</sup>	-0.4 <sup>a</sup>	-16.61 <sup>ab</sup>	392.7 <sup>d</sup>
0.0	3.0	-0.4917 <sup>abc</sup>	3.313 <sup>b</sup>	2.72 <sup>a</sup>	-0.027 <sup>a</sup>	7.8 <sup>a</sup>	-11.71 <sup>bc</sup>	394.3 <sup>d</sup>
0.5	0.0	-0.3517 <sup>bc</sup>	5.432 <sup>bcd</sup>	10.80 <sup>a</sup>	-0.0050 <sup>ab</sup>	13.4 <sup>a</sup>	-8.88 <sup>c</sup>	354.5 <sup>c</sup>
0.5	1.0	-0.3033 <sup>bc</sup>	3.967 <sup>bcd</sup>	4.50 <sup>a</sup>	-0.013 <sup>ab</sup>	4.4 <sup>a</sup>	-7.26 <sup>cd</sup>	353.2 <sup>c</sup>
0.5	2.0	-0.2217 <sup>cd</sup>	4.417 <sup>bcd</sup>	3.42 <sup>a</sup>	0.00167 <sup>b</sup>	4.9 <sup>a</sup>	-6.67 <sup>cde</sup>	375.8 <sup>cd</sup>
0.5	3.0	-0.1683 <sup>cd</sup>	4.655 <sup>bcd</sup>	4.25 <sup>a</sup>	-0.00167 <sup>b</sup>	6.9 <sup>a</sup>	-4.24 <sup>cde</sup>	369.5 <sup>cd</sup>
1.0	0.0	0.0600 <sup>d</sup>	5.643 <sup>cd</sup>	15.81 <sup>a</sup>	-0.003 <sup>b</sup>	52.7 <sup>a</sup>	0.68 <sup>e</sup>	383.5 <sup>cd</sup>
1.0	1.0	0.0867 <sup>d</sup>	6.118 <sup>c</sup>	3.39 <sup>a</sup>	0.003 <sup>b</sup>	10.1 <sup>a</sup>	-0.77 <sup>de</sup>	364.7 <sup>cd</sup>
1.0	2.0	0.9117 <sup>e</sup>	-0.283 <sup>a</sup>	44.11 <sup>b</sup>	0.06167 <sup>def</sup>	223.7 <sup>b</sup>	27.24 <sup>f</sup>	303.3 <sup>b</sup>
1.0	3.0	1.0817 <sup>ef</sup>	0.157 <sup>a</sup>	69.24 <sup>c</sup>	0.05167 <sup>cdef</sup>	254.5 <sup>b</sup>	31.35 <sup>fghi</sup>	287.6 <sup>ab</sup>
1.5	0.0	0.9683 <sup>ef</sup>	0.100 <sup>a</sup>	53.36 <sup>bc</sup>	0.07167 <sup>f</sup>	249.0 <sup>b</sup>	29.72 <sup>fgh</sup>	281.6 <sup>ab</sup>
1.5	1.0	0.9117 <sup>e</sup>	-0.033 <sup>a</sup>	50.53 <sup>bc</sup>	0.04167 <sup>cd</sup>	212.0 <sup>b</sup>	27.87 <sup>fg</sup>	280.3 <sup>ab</sup>
1.5	2.0	1.2483 <sup>efg</sup>	-1.005 <sup>a</sup>	52.31 <sup>bc</sup>	0.04667 <sup>cde</sup>	241.8 <sup>b</sup>	34.97 <sup>ghi</sup>	257.4 <sup>a</sup>
1.5	3.0	1.1517 <sup>efg</sup>	-0.358 <sup>a</sup>	49.96 <sup>bc</sup>	0.05167 <sup>cdef</sup>	234.8 <sup>b</sup>	32.33 <sup>fghi</sup>	287.3 <sup>ab</sup>
2.0	0.0	1.2817 <sup>fg</sup>	-0.822 <sup>a</sup>	50.24 <sup>bc</sup>	0.06833 <sup>ef</sup>	206.5 <sup>b</sup>	35.57 <sup>hi</sup>	261.6 <sup>a</sup>
2.0	1.0	1.2283 <sup>efg</sup>	-0.308 <sup>a</sup>	51.06 <sup>bc</sup>	0.05833 <sup>cdef</sup>	224.8 <sup>b</sup>	34.61 <sup>fghi</sup>	290.8 <sup>ab</sup>
2.0	2.0	1.2350 <sup>efg</sup>	0.400 <sup>a</sup>	53.03 <sup>bc</sup>	0.03833 <sup>c</sup>	209.2 <sup>b</sup>	34.24 <sup>fghi</sup>	262.1 <sup>a</sup>
2.0	3.0	1.4967 <sup>g</sup>	-0.283 <sup>a</sup>	56.29 <sup>bc</sup>	0.05500 <sup>cdef</sup>	249.8 <sup>b</sup>	38.80 <sup>i</sup>	285.4 <sup>ab</sup>

Sumber: Kobango *et al.* (2022)

Pengaplikasian antara kapur pertanian dan pupuk kandang ayam masing-masingnya sudah memberikan perubahan yang signifikan, namun ketika keduanya dikombinasikan pada dosis 2 ton/ha kapur pertanian

dengan 3 ton/ha pupuk kandang ayam memberikan efek yang lebih besar dibandingkan saat diberikan secara terpisah. Kenaikan pH 2.28 daripada kontrol pada pemberian 5 ton/ha kapur pertanian dengan 10 ton/ha pupuk kandang yang masing-masingnya hanya menaikkan 1.33 dan 2.19. Hal ini diduga disebabkan karena kombinasi pengaruh dari kapur pertanian dan pupuk kandang ayam. Ketika kapur diaplikasikan ke tanah, ia menghasilkan sejumlah besar ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$  yang menggantikan  $\text{H}^+$ , ion  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  dan  $\text{Cu}^{2+}$  dari kompleks jerapan tanah mengakibatkan peningkatan pH tanah. Sementara itu, kotoran ayam meningkatkan pH tanah karena adanya unsur Ca dan Mg di dalamnya dan kapasitas *buffer*-nya karena membentuk kompleks dengan Al, Mn dan Fe pada tanah masam.

Kombinasi kapur dengan pupuk kandang ayam menunjukkan tren penurunan KTK dengan peningkatan dosis. Pengaplikasian 1 ton/ha kapur dengan pemberian pupuk kandang ayam dalam jumlah yang sama mengakibatkan perubahan KTK yang tinggi yaitu sebesar 6,118 meq/100 g yang tidak berbeda nyata dengan nilai yang diperoleh pada 0,5 ton/ha kapur pertanian dengan empat dosis pupuk kandang ayam; kontrol dan pupuk kandang ayam pada dosis 1 dan 2 ton/ha tanpa kapur (Tabel 7.9). Pemberian kapur pertanian dengan pupuk kandang ayam dengan melebihi 1 ton/ha kapur dengan 1 ton/ha pupuk kandang ayam mengakibatkan penurunan perubahan KTK.

Pengaplikasian kapur pertanian di Mukono memengaruhi P pada tanah dengan kedalaman 0-15 cm (Tabel 7.9). Tren tersebut menunjukkan peningkatan perubahan P seiring dengan peningkatan dosis kapur P terendah diperoleh pada 0.5 ton/ha dan tertinggi 52.66 ppm pada 2 ton/ha. Sebaliknya, penggunaan pupuk kandang ayam saja tidak menimbulkan dampak apa pun, namun ketika kapur dicampur dengan pupuk kandang ayam, terjadi peningkatan yang signifikan. Kecenderungan menunjukkan peningkatan perubahan P dengan peningkatan kadar kapur dan pupuk kandang ayam (Tabel 7.9). Perubahan P tertinggi sebesar 69.24 ppm diperoleh pada penambahan kapur sebanyak 1 ton/ha. dikombinasikan dengan 3 ton/ha pupuk kandang ayam tidak berbeda nyata dari nilai yang diperoleh pada 1.5 ton/ha dan 2 ton/ha kapur pertanian dengan dosis pupuk kandang ayam (Tabel 7.9). Artinya jika tujuannya adalah untuk

meningkatkan P yang selalu menjadi faktor pembatas pada Ferralsol, maka pemberian kapur pada 1 ton/ha dengan 3 ton/ha kotoran ayam mungkin cukup. Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa kapur saja menyebabkan peningkatan perubahan P yang signifikan sebesar 33.1 ppm pada 1 ton/ha dibandingkan dengan kontrol dan 0.5 ton/ha. Ketika kapur meningkat menjadi 1 ton/ha perubahan P (51.5 ppm) meningkat secara signifikan dan pada peningkatan dosis menjadi 2 ton/ha, perubahan P (52.7 ppm) tidak berbeda nyata dengan yang diperoleh dengan 1 ton/ha kapur. Dapat disimpulkan bahwa kombinasi kapur pertanian dengan pupuk kandang ayam dapat memberikan manfaat pada ketersediaan P di Ferralsols.

Pemberian kapur menghasilkan perubahan N yang nyata. Kecenderungan ini menunjukkan peningkatan perubahan N seiring dengan peningkatan jumlah pengapuran (Tabel 7.9). Dampak jangka pendek dari pengapuran meningkatkan ketersediaan N karena perbaikan kondisi pH yang pada gilirannya meningkatkan proses biologis tanah seperti siklus N (Holland *et al.*, 2017). Pemberian pupuk kandang ayam saja tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap N, namun kombinasi kapur pada dosis rendah dengan pupuk kandang ayam memberikan pengaruh yang nyata (Tabel 7.9) Penggunaan 1.5 ton/ha kapur saja menghasilkan perubahan N sebesar 0.072% yang tidak berbeda nyata dengan 0.062 dan 0.052% yang diperoleh ketika 1 ton/ha kapur dengan 2 atau 3 ton/ha diterapkan masing-masing.

Ketika kapur dikombinasikan dengan pupuk kandang ayam diperoleh kecenderungan peningkatan perubahan K yang serupa dengan peningkatan dosis kapur dengan pupuk kandang ayam. Perubahan K tertinggi sebesar 254.5 ppm diperoleh ketika 1 ton/ha kapur diaplikasikan dengan 3 ton/ha kotoran ayam (Tabel 7.9). Namun hal ini tidak berbeda nyata dengan 223.7 ppm yang diperoleh dengan pemberian 1 ton/ha kapur dengan 2 ton/ha pupuk kandang ayam dan 1.5 dan 2 ton/ha kapur dengan empat dosis pupuk kandang ayam. Artinya, kandungan K dapat ditingkatkan secara signifikan dengan pemberian kapur sebanyak 1 ton/ha dengan 2 atau 3 ton/ha pupuk kandang ayam. Perubahan K jauh lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian kapur atau kotoran ayam secara terpisah. Pada takaran 1 ton/ha jika diberi kapur tunggal diperoleh 135.2

ppm dan bila pupuk kandang ayam diberikan tunggal pada 2 ton/ha diperoleh 135.8 ppm dan pada 3 ton/ha diperoleh 150.8 ppm. Sedikit peningkatan pada K yang dapat ditukar dilaporkan ketika kapur ( $\text{CaCO}_3$ ) diaplikasikan pada tanah masam (Chimdi *et al.*, 2012). Dijelaskan bahwa ketersediaan K dikaitkan dengan dampak pH terhadap pelepasan K dari ruang antar lapisan pada lempung (Holland *et al.*, 2017). Peningkatan perubahan K ketika pupuk kandang ayam diterapkan disebabkan oleh pelepasan K dari pupuk kandang.

Pemberian kombinasi kapur dengan pupuk kandang ayam berpengaruh nyata terhadap perubahan kejenuhan basa. Perubahan kejenuhan basa tertinggi sebesar 38.80% diperoleh pada pengapuran 2 ton/ha kapur dengan 3 ton/ha pupuk kandang ayam namun hal ini tidak berbeda nyata dengan penambahan kejenuhan basa dengan dosis 1.5 ton/ha kapur diberikan dengan 2 atau 3 ton/ha kotoran ayam atau ketika kapur dengan dosis 2 ton/ha tanpa pupuk kandang ayam atau dengan pupuk kandang ayam pada dosis 1 atau 2 ton/ha (Tabel 7.9). Peningkatan kejenuhan basa disebabkan oleh adanya Ca dan Mg yang terkandung dalam kapur serta ion-ion basa yang terdapat pada pupuk kandang ayam. Pada penelitian ini pupuk kandang ayam yang digunakan pada percobaan Mukono mengandung Ca 4.44%, Mg 0.75%, K 1.83% dan Na 0.32% berdasarkan berat kering.

Perubahan Mn menurun secara signifikan seiring dengan meningkatnya dosis pengapuran. Perubahan kandungan Mn tertinggi sebesar 395.5 ppm terjadi pada kontrol dan terendah sebesar 275 ppm dengan takaran pengapuran 2 ton/ha (Tabel 7.9). Pemberian kapur dengan pupuk kandang ayam berpengaruh nyata terhadap perubahan Mn. Tren tersebut menunjukkan tren penurunan dengan meningkatnya takaran kapur pada keempat dosis pupuk kandang ayam (Tabel 7.9). Perubahan Mn terendah sebesar 257.4 ppm diperoleh pada pengapuran 1.5 ton/ha yang diberi pupuk kandang ayam sebanyak 2 ton/ha dan hal ini tidak berbeda nyata dengan keempat takaran pupuk kandang pada dosis kapur yang sama yakni 1.5 dan 2 ton/ha dengan empat dosis pupuk kandang ayam namun jauh lebih rendah dibandingkan kontrol, dosis kapur sebesar 0.5 dan 1 ton/ha dengan empat dosis pupuk kandang ayam (Tabel 7.9). Ketika kapur diaplikasikan secara terpisah dengan dosis 1.5 ton/ha, perubahan Mn

adalah 276.6 ppm dan pemberian pupuk kandang ayam saja tidak memengaruhi perubahan Mn secara signifikan. Namun, pengurangan yang diperoleh ketika sejumlah kecil kapur sebanyak 1.5 ton/ha dengan kotoran ayam sebesar 2 ton/ha menunjukkan pentingnya menggabungkan keduanya dalam pengurangan toksisitas Mn pada Ferralsol.

### **7.3. Kompos**

#### **7.3.1. Sumber Kompos dan Proses Pengomposan**

Kompos terdiri dari bahan organik terurai yang relatif stabil yang dihasilkan dari percepatan degradasi biologis bahan organik di bawah kondisi aerobik yang terkontrol (Storey, 1995; Epstein, 1997 dalam Shokalu *et al.*, 2010). Pupuk kompos terbuat dari sisa-sisa tumbuhan dan hewan dengan tujuan daur ulang untuk produksi tanaman. Proses dekomposisi mengubah bahan organik yang berpotensi beracun atau membusuk menjadi keadaan stabil yang dapat meningkatkan kesuburan tanah untuk pertumbuhan tanaman. Pupuk kompos dapat digunakan sebagai mulsa, untuk pengendalian gulma serta peningkatan kesuburan tanah. (Roe *et al.*, 1997 dalam Shokalu *et al.*, 2010). Kompos memiliki efek menguntungkan lainnya, termasuk mengalihkan limbah TPA ke penggunaan alternatif, menghilangkan inokula patogen atau biji gulma dan dekomposisi minyak bumi, herbisida atau residu pestisida, pengendalian erosi dan sebagai sumber nutrisi untuk revegetasi berkelanjutan dari tanah yang terdegradasi.

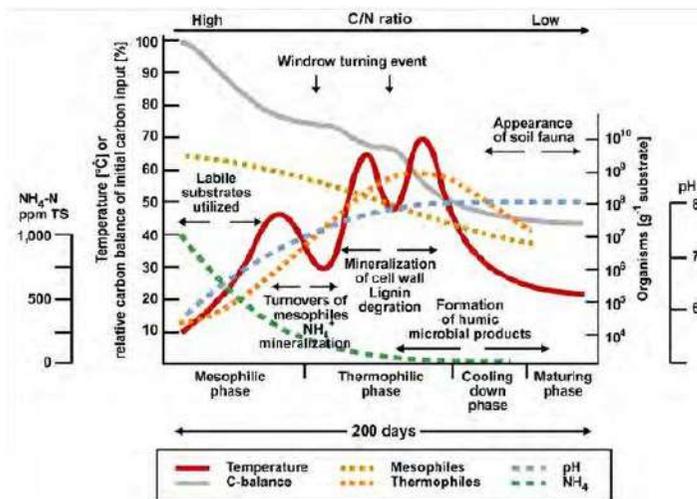
Pada dasarnya semua bahan-bahan organik padat dapat dikomposkan, misalnya: limbah organik rumah tangga, sampah-sampah organik pasar/kota, kertas, kotoran/limbah peternakan, limbah-limbah pertanian, limbah-limbah agroindustri, limbah pabrik kertas, limbah pabrik gula, limbah pabrik kelapa sawit, dan lain-lainnya. Proses pengomposan akan segera berlangsung setelah bahan-bahan mentah dicampur (Wiratini *et al.*, 2017).

Pengomposan adalah proses biologis yang terjadi dalam kondisi aerobik (adanya oksigen) dengan kelembapan dan suhu yang memadai, transformasi higienis limbah organik dalam bahan yang homogen dan tersedia tanaman. Selama proses pengomposan berbagai mikroorganisme melakukan proses metabolisme yang kompleks untuk menghasilkan

biomassa mikroba mereka sendiri dengan adanya oksigen (O), nitrogen (N) dan karbon (C). Dalam proses ini, selain itu, mikroorganisme menghasilkan panas dan substrat padat, dengan lebih sedikit karbon dan nitrogen, tetapi lebih stabil, yang disebut kompos (FAO, 1980 dan 2020 dalam Meena *et al.*, 2021). Selama proses dekomposisi C organik kompleks awal, N dan bahan organik panas yang terukur dihasilkan karena aktivitas metabolisme mikroorganisme yang menyebabkan variasi suhu selama periode waktu proses dekomposisi. Tiga fase utama pengomposan telah diidentifikasi berdasarkan variasi suhu selain fase pematangan. Fase-fase pengomposan yang berbeda ini telah diklasifikasikan menurut suhunya (Meena *et al.*, 2021) sebagai berikut:

1. *Hot Phase (Mesophilic Phase)*

Proses pengomposan dimulai pada suhu *ambient* (suhu sekitar/suhu ruang) dan dalam beberapa hari (atau bahkan berjam-jam), suhu naik hingga 45 °C. Aktivitas metabolisme berbagai kelompok mikroorganisme heterogen menghasilkan peningkatan suhu karena mikroba ini menggunakan N dan C dari bahan organik untuk asimilasi tubuh mereka. Dekomposisi senyawa larut, seperti gula, menghasilkan asam organik dan karenanya, pH dapat turun (menjadi sekitar 4,0 atau 4,5). Fase panas berlangsung selama dua hingga delapan hari.



Gambar 7.9 Fase pengomposan (Fischer and Glaser, 2012)

## 2. *Curing Phase (Thermophilic and Hygienization Phase)*

Ketika suhu bahan organik induk mencapai suhu lebih tinggi dari 45 °C, mikroorganisme mesofilik digantikan oleh mikroorganisme termofilik (kebanyakan bakteri termofilik) yang memiliki kapasitas untuk tumbuh pada suhu yang lebih tinggi. Mikroorganisme termofilik ini memfasilitasi degradasi bahan organik kompleks yaitu, selulosa dan lignin. Konversi nitrogen menjadi amonia oleh mikroba termofilik menghasilkan kenaikan pH tumpukan kompos selama tahap ini (FAO, 1980 dan 2020 dalam Meena *et al.*, 2021). Secara khusus, pada suhu lebih dari 60 °C, bakteri penghasil spora dan aktinobakteri yang bertanggung jawab untuk memecah lilin, hemiselulosa, dan senyawa C kompleks lainnya, mulai berkembang. Suhu tinggi tumpukan kompos selama fase ini membantu dalam membunuh kontaminan dan bakteri yang berasal dari feses yaitu, *Escherichia*, *Salmonella* sp. Kista dan telur cacing, spora jamur fitopatogen dan biji gulma bakteri berbahaya lainnya yang ada dalam bahan induk. Dengan demikian fase ini juga dikenal sebagai fase higienis.

## 3. *Cooling or Mesophilic Phase II*

Setelah penggunaan sumber karbon dan nitrogen dari bahan kompos, suhu tumpukan menurun lagi menjadi sekitar 40-45 °C. Selama fase mesofilik, degradasi polimer saat selulosa berlanjut dan beberapa jamur yang terlihat dengan mata telanjang muncul. Ketika suhu turun di bawah 40 °C, aktivitas organisme mesofilik dilanjutkan dan pH tumpukan kompos sedikit menurun, sedangkan secara umum pH tumpukan kompos tetap sedikit basa (Acharya, 1950 dalam Meena *et al.*, 2021). Beberapa jamur dapat berkembang dan bahkan menghasilkan struktur yang terlihat. Fase pendinginan ini membutuhkan beberapa minggu dan mungkin hampir sama dengan fase pematangan.

## 4. *Maturation Phase*

Selama fase pematangan, suhu tumpukan kompos turun ke tingkat suhu sekitar (20-30 °C). Selama fase ini kondensasi senyawa karbon dan polimerisasi terjadi, yang selanjutnya membantu dalam pembentukan asam fulvat dan humat.

### 7.3.2. Karakteristik dan Faktor yang Memengaruhi Pengomposan

Proses pengomposan secara sederhana dapat dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap aktif dan tahap pematangan. Selama tahap-tahap awal proses, oksigen dan senyawa-senyawa yang mudah terdegradasi akan segera dimanfaatkan oleh mikroba mesofilik. Suhu tumpukan kompos akan meningkat dengan cepat. Demikian pula akan diikuti dengan peningkatan pH kompos. Suhu akan meningkat hingga di atas 50°-70° C. Suhu akan tetap tinggi selama waktu tertentu. Mikroba yang aktif pada kondisi ini adalah mikroba Termofilik, yaitu mikroba yang aktif pada suhu tinggi. Pada saat ini terjadi dekomposisi/penguraian bahan organik yang sangat aktif. Mikroba-mikroba di dalam kompos dengan menggunakan oksigen akan menguraikan bahan organik menjadi CO<sub>2</sub>, uap air dan panas. Setelah sebagian besar bahan telah terurai, maka suhu akan berangsur-angsur mengalami penurunan. Pada saat ini terjadi pematangan kompos tingkat lanjut, yaitu pembentukan kompleks liat humus. Selama proses pengomposan akan terjadi penyusutan volume maupun biomassa bahan. Pengurangan ini dapat mencapai 30-40% dari volume/bobot awal bahan (Wiratini *et al.*, 2017).

Faktor-faktor yang memengaruhi proses pengomposan telah dirangkum oleh Wiratini *et al.* (2017):

1. Rasio C/N

Rasio C/N yang efektif untuk proses pengomposan berkisar antara 30: 1 hingga 40:1. Mikroba memecah senyawa C sebagai sumber energi dan menggunakan N untuk sintesis protein. Pada rasio C/N di antara 30 s/d 40 mikroba mendapatkan cukup C untuk energi dan N untuk sintesis protein. Apabila rasio C/N terlalu tinggi, mikroba akan kekurangan N untuk sintesis protein sehingga dekomposisi berjalan lambat. Umumnya, masalah utama pengomposan adalah pada rasio C/N yang tinggi, terutama jika bahan utamanya adalah bahan yang mengandung kadar kayu tinggi (sisa gergajian kayu, ranting, ampas tebu, dsb). Untuk menurunkan rasio C/N diperlukan perlakuan khusus, misalnya menambahkan mikroorganisme selulolitik (Toharisman, 1991 dalam Wiratini *et al.*, 2017) atau dengan menambahkan kotoran hewan karena kotoran hewan mengandung banyak senyawa nitrogen.

Rasio C:N berubah sesuai dengan bahan induk yang digunakan untuk pengomposan. Rasio C:N bervariasi sepanjang proses pengomposan, dengan penurunan terus menerus dari 35:1 menjadi 15:1. Beberapa cara untuk mengontrol rasio C:N selama pengomposan:

Tabel 7.10 Cara mengontrol rasio C:N selama pengomposan

Rasio C:N	Masalah yang disebabkan	Solusi
>35:1	Kelebihan C Ada sejumlah besar bahan kaya karbon dalam campuran. Prosesnya cenderung mendingin dan melambat.	Tambahkan bahan yang kaya nitrogen sampai rasio C: N yang sesuai tercapai
<15-1	Kelebihan N Ada jumlah bahan kaya nitrogen yang lebih tinggi dalam campuran. Proses ini cenderung terlalu panas menghasilkan bau dari amonia yang dilepaskan.	Tambahkan bahan dengan kandungan karbon tinggi (sisa pemangkasan, daun kering, serbuk gergaji)

## 2. Ukuran Partikel

Aktivitas mikroba berada di antara permukaan area dan udara. Permukaan area yang lebih luas akan meningkatkan kontak antara mikroba dengan bahan dan proses dekomposisi akan berjalan lebih cepat. Ukuran partikel juga menentukan besarnya ruang antar bahan (porositas). Untuk meningkatkan luas permukaan dapat dilakukan dengan memperkecil ukuran partikel bahan tersebut.

Aktivitas mikroba terkait dengan ukuran partikel, yaitu akses mudah ke substrat. Ukuran partikel pengomposan yang sangat kecil meningkatkan luas permukaan spesifik, yang memfasilitasi akses yang lebih besar ke substrat. Ukuran ideal bahan induk untuk pengomposan adalah 5 hingga 20 cm. kepadatan bahan kompos, terkait erat dengan ukuran partikel dan pada akhirnya memengaruhi aerasi dan retensi kelembapan tumpukan kompos. Kepadatan bahan pengomposan pada awal pengomposan tetap kurang lebih 150-250 kg/m<sup>3</sup> yang meningkat hingga 600-700 kg/m<sup>3</sup> dengan berjalannya proses pengomposan. Beberapa cara untuk mengontrol ukuran partikel selama pengomposan:

Tabel 7.11 Cara mengontrol ukuran partikel selama pengomposan

Ukuran Partikel	Masalah yang disebabkan	Solusi
>30 cm	Kelebihan aerasi	Bahan berukuran besar membentuk saluran aerasi, menurunkan suhu dan memperlambat proses
<5 cm	Pemadatan	Partikel yang terlalu halus membentuk pori-pori kecil yang terisi air, memfasilitasi pemadatan material dan aliran udara yang terbatas yang menyebabkan anaerobiosis.

### 3. Aerasi

Pengomposan adalah proses aerobik dan aerasi yang memadai harus dijaga untuk memungkinkan respirasi mikroorganisme yang melepaskan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) ke atmosfer. Demikian pula, aerasi juga membantu dalam mengurangi pemadatan atau pengisian air dalam bahan kompos. Kebutuhan oksigen bervariasi selama proses, mencapai tingkat konsumsi tertinggi selama fase termofilik.

Tingkat saturasi oksigen dari tumpukan kompos tidak boleh <5% (tingkat optimal 10%) (Raabe, 2001 dalam Meena *et al.*, 2021). Tingkat aerasi yang berlebihan mengakibatkan penurunan suhu dan kehilangan kelembapan oleh proses penguapan dan rendahnya tingkat kelembapan menghambat proses dekomposisi. Kelebihan aerasi juga menyebabkan dehidrasi sel mikroorganisme yang selanjutnya menghambat produksi spora dan enzim yang berkembang biak degradasi berbagai senyawa bahan organik tambahan (NRAES, 1992 dalam Meena *et al.*, 2021). Sebaliknya, tingkat aerasi yang rendah (biasanya di bawah 5%), menghasilkan kelembapan yang berlebihan yang selanjutnya menghasilkan kelembapan berlebih dan lingkungan anaerob. Bau dan keasaman kemudian dihasilkan oleh adanya senyawa seperti asam asetat, hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S) atau metana (CH<sub>4</sub>) secara berlebihan (Meena *et al.*, 2021). Sehingga dapat disimpulkan bahwa *range* ideal dalam aerasi pengomposan adalah 5-15%.

Sederhananya, pengomposan yang cepat dapat terjadi dalam kondisi yang cukup oksigen (aerob). Aerasi secara alami akan terjadi pada saat

terjadi peningkatan suhu yang menyebabkan udara hangat keluar dan udara yang lebih dingin masuk ke dalam tumpukan kompos. Aerasi ditentukan oleh porositas dan kandungan air bahan(kelembapan). Apabila aerasi terhambat, maka akan terjadi proses anaerob yang akan menghasilkan bau yang tidak sedap. Aerasi dapat ditingkatkan dengan melakukan pembalikan atau mengalirkan udara di dalam tumpukan kompos (Wiratini *et al.*, 2017). Selain itu juga dapat diatasi dengan memotong bahan baku kompos untuk memperkecil ukuran pori dan penambahan air atau bahan segar dengan lebih kandungan air yang lebih banyak seperti potongan buah dan sayur, rumput, pupuk cair.

#### 4. Porositas

Porositas adalah ruang di antara partikel di dalam tumpukan kompos. Porositas dihitung dengan mengukur volume rongga dibagi dengan volume total. Rongga-rongga ini akan diisi oleh air dan udara. Udara akan menyuplai Oksigen untuk proses pengomposan. Apabila rongga dijenuhi oleh air, maka pasokan oksigen akan berkurang dan proses pengomposan juga akan terganggu.

#### 5. Kelembapan (*Moisture content*)

Kelembapan memegang peranan yang sangat penting dalam proses metabolisme mikroba dan secara tidak langsung berpengaruh pada suplay oksigen. Mikroorganisme dapat memanfaatkan bahan organik apabila bahan organik tersebut larut di dalam air. Kelembapan 40-60% adalah kisaran optimum untuk metabolisme mikroba. Menurut Rasyid *et al.* (2015), kelembapan yang tinggi pada proses anaerobik diperlukan bakteri untuk membentuk senyawa-senyawa gas dan beraneka macam asam organik sehingga pengendapan kompos akan lebih cepat. Apabila kelembapan di bawah 40%, aktivitas mikroba akan mengalami penurunan dan akan lebih rendah lagi pada kelembapan 15%. Apabila kelembapan lebih besar dari 60%, hara akan tercuci, volume udara berkurang, akibatnya aktivitas mikroba akan menurun dan akan terjadi fermentasi anaerobik yang menimbulkan bau tidak sedap.

Aktivitas mikroba dan tingkat kelembapan dalam bahan pengomposan terkait erat satu sama lain karena air yang ada dalam bahan

baku digunakan oleh mikroorganisme untuk transportasi nutrisi dan energi melalui membran sel mereka. Tingkat kelembapan dalam bahan pengomposan bervariasi berdasarkan ukuran partikel, kondisi fisik bahan dan sistem pengomposan. Tingkat kelembapan ideal dalam bahan kompos harus sekitar 55%. Beberapa cara untuk mengontrol kelembapan selama pengomposan:

Tabel 7.12 Cara mengontrol kelembapan selama pengomposan

Persentase Kelembapan	Masalah yang disebabkan		Solusi
<45%	Kelembapan tidak cukup	Dapat menghentikan pengomposan karena keterbatasan air untuk mikroorganisme	Kelembapan harus diatur, baik dengan menambahkan air atau bahan segar dengan kadar air yang lebih tinggi (limbah buah dan sayuran, rumput dan pupuk kandang cair)
>60%	Oksigen tidak cukup	Bahan terlalu basah, oksigen dipindahkan. Dapat mengembangkan zona anaerob.	Balikkan campuran dan/atau tambahkan bahan kadar air rendah dengan kandungan karbon tinggi seperti serbuk gergaji, jerami atau daun kering.

## 6. Temperatur/suhu

Panas dihasilkan dari aktivitas mikroba. Ada hubungan langsung antara peningkatan suhu dengan konsumsi oksigen. Semakin tinggi temperatur akan semakin banyak konsumsi oksigen dan akan semakin cepat pula proses dekomposisi. Peningkatan suhu dapat terjadi dengan cepat pada tumpukan kompos. Temperatur yang berkisar antara 30-60°C menunjukkan aktivitas pengomposan yang cepat. Suhu yang lebih tinggi dari 60°C akan membunuh sebagian mikroba dan hanya mikroba termofilik saja yang akan tetap bertahan hidup. Suhu yang tinggi juga akan membunuh mikroba-mikroba patogen tanaman dan benih-benih gulma.

Suhu ambien memiliki berbagai variasi tergantung pada fase proses. Pengomposan dimulai pada suhu sekitar yang dapat naik hingga 65 °C tanpa perlu campur tangan manusia (pemanasan eksternal). Sementara, selama fase pematangan tumpukan kompos mencapai suhu sekitar. Suhu

tinggi dan periode waktu yang lebih lama memiliki tingkat dekomposisi dan *hygienization* yang tinggi, sehingga suhu tumpukan tidak boleh turun lebih cepat. Sehingga suhu ini perlu dijaga agar terjadi pengomposan yang optimal. Berikut beberapa cara dalam mengontrol suhu selama pengomposan:

Tabel 7.13 Cara mengontrol suhu selama pengomposan

Suhu	Masalah yang disebabkan		Solusi
Suhu rendah (<35%)	Kurangnya kelembapan	Suhu rendah dapat terjadi oleh beberapa faktor, seperti kurangnya kelembapan, sehingga mikroorganisme mengurangi aktivitas metabolisme dan Karena itu, suhu turun.	Basahi bahan atau tambahkan segar bahan dengan kelembapan lebih tinggi persentase (buah atau sayuran limbah atau lainnya)
	Bahan tidak mencukupi	Bahan tidak mencukupi atau bentuk tumpukan kompos yang tidak memadai untuk mencapai suhu yang sesuai	Tambahkan lebih banyak bahan ke tumpukan kompos
	Defisit nitrogen atau rasio C:N rendah	Bahan memiliki rasio C: N yang tinggi dan karenanya, mikroorganisme tidak memiliki N yang diperlukan untuk menghasilkan protein dan enzim dan memperlambat aktivitasnya. Tumpukan membutuhkan waktu lebih dari seminggu untuk meningkatkan suhu.	Tambahkan bahan dengan kandungan N tinggi seperti pupuk kandang.
Suhu Tinggi (>70%)	Ventilasi dan kelembapan tidak mencukupi	Suhu terlalu tinggi dan dekomposisi terhambat, karena sebagian besar mikroorganisme tidak aktif dan mati.	Putar campuran dan/atau tambahkan bahan kandungan C tinggi dari degradasi lambat (kayu atau rumput kering) untuk memperlambat proses.

## 7. pH

Proses pengomposan dapat terjadi pada kisaran pH yang lebar. pH yang optimum untuk proses pengomposan berkisar antara 6.5 sampai 7.5. pH kotoran ternak umumnya berkisar antara 6.8 hingga 7.4. Proses pengomposan sendiri akan menyebabkan perubahan pada bahan organik dan pH bahan itu sendiri. Sebagai contoh, proses pelepasan asam, secara temporer atau lokal, akan menyebabkan penurunan pH (pengasaman), sedangkan produksi amonia dari senyawa-senyawa yang mengandung nitrogen akan meningkatkan pH pada fase-fase awal pengomposan. pH kompos yang sudah matang biasanya mendekati netral.

pH pengomposan tergantung pada bahan sumber dan bervariasi di setiap fase proses (dari 4,5 hingga 8,5). Selama fase awal pengomposan, pH tumpukan kompos diasamkan karena pelepasan berbagai asam organik oleh mikroorganisme. Pada fase termofilik, karena konversi amonium menjadi amonia, pH naik, media dialkali untuk akhirnya stabil pada nilai yang mendekati netral. pH adalah faktor penentu kelangsungan hidup mikroorganisme dan berbagai kelompok mikroorganisme memiliki kisaran pH optimal untuk pertumbuhan dan perbanyakan. Sebagian besar aktivitas bakteri terjadi pada pH 6,0-7,5, sedangkan sebagian besar aktivitas jamur terjadi pada pH 5,5 hingga 8,0. Kisaran ideal adalah dari 5.8 hingga 7/2. Beberapa cara dalam mengontrol pH selama pengomposan:

Tabel 7.14 Cara mengontrol pH selama pengomposan

pH	Masalah yang disebabkan	Solusi	
< 4.5	Kelebihan asam organik	Bahan tanaman seperti limbah dapur, buah, melepaskan banyak asam organik dan cenderung mengasamkan medium.	Tambahkan bahan yang kaya nitrogen sampai rasio C: N yang sesuai tercapai
>8.5	Kelebihan N	Ketika ada kelebihan nitrogen dalam bahan sumber, dengan rasio C: N yang buruk terkait dengan lembap dan suhu tinggi, amonia diproduksi dan media dibuat alkali.	Tambahkan bahan kering dengan kandungan karbon tinggi (sisa pemangkasan, daun kering, serbuk gergaji)

### 7.3.3. Aplikasi Kompos

Kompos adalah salah satu jenis bahan organik, yang dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi dan efeknya dapat menjadi langsung atau tidak langsung. Efek langsungnya adalah penambahan nutrisi dari kompos, sedangkan secara tidak langsung efek adalah peningkatan aktivitas mikroba, perbaikan struktur tanah dan peningkatan kapasitas menahan air. Berikut beberapa keunggulan pemakaian kompos (Wiratini *et al.*, 2017) antara lain:

1. menghemat biaya untuk transportasi dan penimbunan limbah
2. mengurangi volume/ukuran limbah
3. memiliki nilai jual yang lebih tinggi dari pada bahan asalnya
4. mengurangi polusi udara karena pembakaran limbah dan pelepasan gas metana dari sampah organik yang membusuk akibat bakteri metanogen di tempat pembuangan sampah
5. mengurangi kebutuhan lahan untuk penimbunan
6. meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki struktur dan karakteristik tanah,
7. meningkatkan kapasitas penyerapan air oleh tanah,
8. meningkatkan aktivitas mikroba tanah,
9. meningkatkan kualitas hasil panen (rasa, nilai gizi, dan jumlah panen)
10. menyediakan hormon dan vitamin bagi tanaman
11. menekan pertumbuhan/serangan penyakit tanaman
12. meningkatkan retensi/ketersediaan hara di dalam tanah.

Talakua dan Kaya (2019) melakukan penelitian mengenai pengaruh pemberian kompos sagu ela terhadap sifat fisika tanah seperti pada Tabel 7.15. Pemberian kompos sagu ela dapat memperbaiki sifat fisik tanah yang mampu menurunkan bobot volume (dari 0,85 menjadi 0,73 g/cm<sup>3</sup>), kerapatan partikel (dari 2,16 menjadi 1,78 g/cm<sup>3</sup>) dan pori-pori drainase (dari 18,11 menjadi 7,69%) dan mampu meningkatkan kadar air kapasitas lapang (dari 38,13 menjadi 43,91%) dan pori air tersedia (dari 11,88 menjadi 17,00%).

Tabel 7.15 Pengaruh pemberian kompos sagu terhadap sifat fisik tanah

Perlakuan	Bobot Volume (g/cm <sup>3</sup> )	Kerapatan Partikel (g/cm <sup>3</sup> )	Pori drainase	Kadar air kapasitas lapang	Pori air tersedia
K <sub>0</sub> (0 t/ha)	0.84 a	2.16 a	18.11 a	38.13 a	11.88 a
K <sub>1</sub> (30 t/ha)	0.85 a	2.09 ab	14.36 a	40.47 ab	13.37 a
K <sub>2</sub> (45 t/ha)	0.73 b	1.85 b	16.57 a	38.54 a	11.76 a
K <sub>3</sub> (60 t/ha)	0.77 b	1.78 c	7.69 b	43.91 b	17.00 b

Sumber: Talakua dan Kaya (2019)

Kompos sagu ela sebagai pupuk organik dapat meningkatkan hasil panen jagung sebesar 89,80 g/tanaman atau 4,28 t/ha. Dosis optimal kompos sagu ela sebagai pupuk organik yang ditemukan dapat memperbaiki sifat fisik tanah dan meningkatkan hasil panen jagung adalah 60 t/ha. Kompos yang mengandung bahan organik koloid dengan ukuran partikel <1 µm merupakan zat perekat antar partikel dalam proses pembentukan agregat tanah. Bahan organik koloid dalam kompos sagu ela merupakan hasil aktivitas dan perombakan sel mikroba yang mengandung lendir (gusi) sebagai bahan pengikat dalam proses agregasi. Polimer organik yang merupakan polisakarida dengan berat molekul besar berasal dari dinding sel mikroba yang membentuk jaringan seperti jaring yang efektif dalam menyatukan partikel tanah. Polimer hidroksil dan atom oksigen tanah liat-karbon ini membentuk ikatan hidrogen sebagai jembatan pengikat, sedangkan partikel non-koloid dari polimer ini bertindak sebagai lem perekat. Residu serat terdiri dari lignin, selulosa dan hemiselulosa, yang dapat dengan mudah menghasilkan ikatan kimia dengan elektrofil melalui gugus hidroksil. Gugus karboksil ini yang berfungsi untuk pembentukan struktur tanah. Begitu juga pendapat dalam Bayer *et al.* dalam Talakua dan Kaya (2019) bahwa senyawa organik kompleks yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik dapat berfungsi sebagai semen perekat dalam proses granulasi (Talakua and Kaya, 2019).

Cahyono *et al.* (2020) menemukan bahwa pemberian kompos dari nenas sebanyak 25 ton/Ha dapat mengurangi pemberian pupuk kimia sintetis sebanyak 40% tanpa berkurangnya hasil panen. Berikut hasil dari perlakuan kompos nenas terhadap sifat kimia tanah setelah 5 bulan aplikasi, yang dapat dilihat pada Tabel 7.16.

Tabel 7.16 Sifat kimia tanah setelah lima bulan pengaplikasian kompos nenas

Sifat Kimia	Dosis Kompos (ton/ha)		
	0 (K0)	25(K25)	50(K50)
pH H <sub>2</sub> O	4.93 a	5.68 b	5.88 b
C (%)	1.50 a	2.02 b	2.25 b
N (%)	0.14 a	0.18 b	0.22 b
P (g/kg)	0.024 a	0.028 a	0.032 a
K (g/kg)	0.05 a	0.10 b	0.13 b
Ca (g/kg)	0.26 a	0.62 b	0.84 b
Mg (g/kg)	0.17 a	0.27 b	0.32 b

Sumber: Cahyono *et al.* (2020)

Pada pH tanah, perlakuan pemberian kompos berbeda signifikan terhadap kontrol (tanpa kompos). Terlihat peningkatan pH sebanyak 0.75 dan 0.95 unit pada masing-masing dosis (25 dan 50 ton/Ha) daripada tanpa kompos yang disebabkan oleh nilai pH dari komposnya sendiri yang netral (pH 7.2). Proses mineralisasi pada kompos menyebabkan pelepasan kation-kation basa, yang bersifat alkalis, sehingga pemberian kompos dalam jumlah yang besar, secara terus menerus dapat meningkatkan pH tanah. Pemberian kompos sebanyak 50 ton/ha memberikan peningkatan sebanyak 0.2 unit dari dosis 25 ton/Ha, tapi tidak berbeda signifikan. Selanjutnya pemberian kompos juga meningkatkan kandungan C-Organik Tanah daripada tanpa kompos sebanyak 0.52 dan 0.75 wt%, namun untuk kedua dosis tidak berbeda signifikan. Peningkatan ini disebabkan oleh kandungan C-Organik dari kompos nenas itu yang sudah tinggi yaitu 21.60 wt%. Sesuai dengan Bouajila *and* Sanaa yang menyebutkan bahwa aplikasi dari kompos yang berasal dari pupuk dan limbah rumah tangga memberikan peningkatan yang signifikan pada kandungan karbon organik, di mana hasil yang mereka temukan pada pemberian 120 ton/Ha kompos limbah rumah tangga dan pupuk meningkatkan c-organic (1.74% dan 1.09%) dibandingkan dengan kontrol (0.69%). Kemudian untuk kation yang dapat dipertukarkan seperti Kalium, Kalsium dan Magnesium, juga secara signifikan meningkat dibandingkan kontrol setelah diaplikasikan kompos (25 dan 50 ton/Ha). Hal ini mengartikan bahwa kompos sangat berguna bagi tanaman sebagai sumber kation. Adugna mengungkapkan bahwa hal tersebut terjadi karena mineralisasi kompos melepaskan banyak

nutrisi ke dalam tanah, seperti kalium, kalsium, magnesium, sehingga kandungannya akan meningkat.

Selain itu juga ada Chen (2022) yang melakukan penelitian menggunakan kompos yang berasal dari pupuk kandang yang diaplikasikan selama 3 tahun. Penggunaan kompos pupuk kandang menjanjikan untuk mengurangi keasaman tanah, namun sekaligus meningkatkan akumulasi logam berat di dalam tanah. Dalam percobaan lapangan selama 3 tahun, kompos diterapkan selama 12 musim panen berturut-turut pada 15, 30, dan 45 ton/ha di tanah yang sedikit asam. Sampel diambil pada musim kedua belas untuk mengetahui perubahan sifat tanah, produktivitas sayuran, akumulasi logam berat dan bioavailabilitas pada sistem selada batang. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai pH tanah lapisan atas meningkat sebesar 0,49-0,75 unit pada tanah yang diberi kompos dibandingkan tanpa kompos (kontrol), kandungan bahan organik tanah (SOM) dan kapasitas tukar kation (KTK) meningkat sebesar 34-101% dan 43-44%, masing-masing. Kandungan unsur hara tanah juga meningkat pada perlakuan kompos. Pemberian kompos secara terus-menerus meningkatkan konsentrasi Cd, Cu, dan Zn di lapisan atas tanah hingga 32, 20, dan 22% dan menurunkan Pb sebesar 10%, sementara konsentrasi Cd dan Zn yang tersedia di tanah berkurang hingga 54 dan 86%, dan tersedia Cu meningkat sebesar 19-63%. Biomassa selada batang meningkat sebesar 30-59% pada perlakuan kompos, dengan konsentrasi Cd dan Zn dalam jaringan tanaman berkurang sebesar 28-50% dan 14-67%. Konsentrasi Cu pada pucuk selada batang meningkat sebesar 20-39%. Faktor konsentrasi dan serapan total Cd dan Zn pada selada efektif diturunkan pada perlakuan kompos. Cd lebih mudah terserap, ditranslokasi dan terakumulasi dari tanah ke tanaman selada dibandingkan logam berat lainnya. Penggunaan kompos secara terus-menerus selama 3 tahun akan meningkatkan pH tanah, SOM, KTK, kandungan unsur hara, dan produktivitas selada, menurunkan bioavailabilitas Cd dan Zn dalam sistem tanah-selada, sekaligus menimbulkan risiko peningkatan akumulasi logam berat di lapisan atas tanah.

#### 7.4. Batubara Muda (Sub-bituminus)



Gambar 7.10 Batubara muda saat masih ditanah (A) dan saat telah diambil (B)  
(Sumber: Foto Herviyanti, 2017)

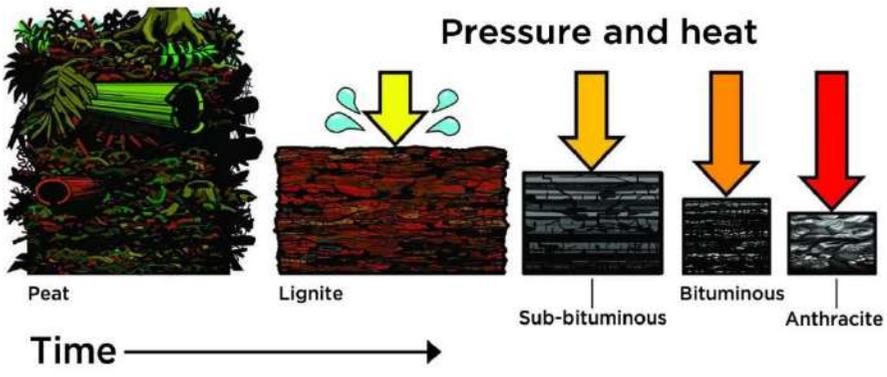
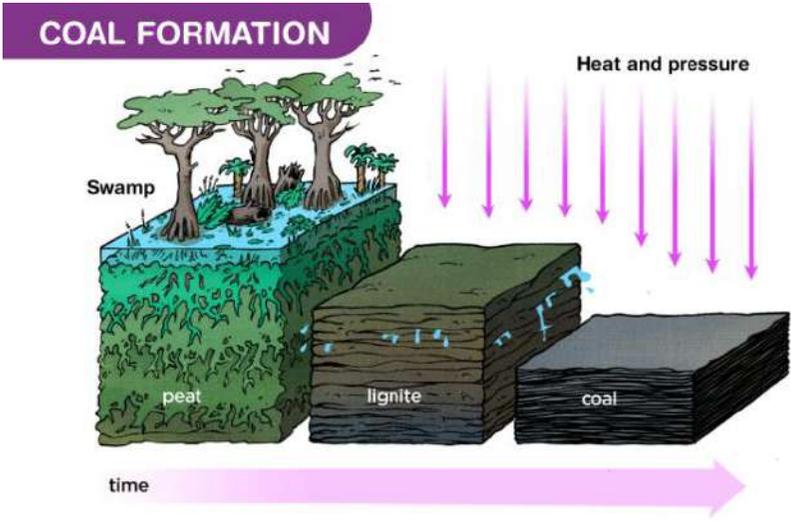
Batubara Muda adalah merupakan batubara dengan tingkat pembatubaraan rendah yang biasanya lebih lembut dengan materi yang rapuh dan berwarna suram seperti tanah, memiliki kelembapan yang lebih tinggi dan kadar karbon yang lebih rendah, sehingga kandungannya juga rendah. Oleh karena itu Sub-bituminus ini tidak efektif dimanfaatkan sebagai sumber energi (Herviyanti *et al.*, 2021)

##### 7.4.1. Proses Pembentukan Batubara Muda

Pembentukan batubara dimulai di daerah lahan basah berawa, di mana air tanah berada dekat atau sedikit di atas *topsoil*. Karena itu, flora yang ada menghasilkan bahan organik dengan cepat, lebih cepat daripada yang dapat terurai. Di daerah-daerah ini, lapisan bahan organik terakumulasi dan kemudian terkubur. Lapisan bahan organik inilah yang kemudian membentuk batubara. Energi di dalam batubara awalnya berasal dari matahari, dan merupakan energi dari sinar matahari yang terperangkap pada tanaman mati. Proses yang menciptakan batubara sedikit bervariasi di daerah yang berbeda tergantung pada tanaman dan kondisi yang ada, tetapi proses keseluruhannya serupa. Ada dua fase utama dalam pembentukan batubara: *peatification* dan *coalification*. Aktivitas bakteri adalah proses utama yang menciptakan gambut dalam *peatification*. Meningkatnya suhu dan tekanan dari penimbunan (penguburan) adalah faktor utama dalam

*coalification* (Energy Education, 2015). Berikut proses pembentukan batubara:

1. Tanaman di rawa dan lahan basah seperti pakis, semak, tanaman merambat, pohon dan ganggang mati dan menumpuk pada permukaan tanah. Awalnya bahan organik diuraikan oleh bakteri, menghasilkan karbon dioksida dan metana.
2. Tanaman-tanaman tersebut menjadi terkubur (tertimbun) dan tidak lagi terkena udara. Bakteri anaerob mulai menguraikan bahan tersebut. Penimbunan dan akumulasi dapat terjadi selama ribuan tahun, menghasilkan beberapa meter dari bahan tersebut yang sebagian membusuk, yang dikenal sebagai gambut
3. Ketika gambut ini tertimbun dalam, air dan senyawa lainnya diperas keluar karena tekanan yang meningkat sehingga mulai terbentuklah batubara kualitas rendah, lignit.
4. Penimbunan yang berkelanjutan, mengakibatkan peningkatan tekanan dan suhu, menyebabkan lignit menjadi 'batubara hitam' yang lebih berkualitas tinggi. Pertama, lignit berubah menjadi Sub-bituminus, kemudian bituminus, dan terakhir menjadi antrasit, batubara kualitas tertinggi. Ketika transformasi ini terjadi, jumlah air dan senyawa lain dalam batubara berkurang dan batubara menjadi lebih padat. Seiring dengan proses ini, muncul konsentrasi karbon yang lebih tinggi



Gambar 7.11 Proses pembentukan batubara  
 (Sumber: <https://byjus.com/chemistry/formation-of-fossil-fuels/>,  
<https://www.ucsusa.org/resources/how-coal-works>)

Faktor penting dalam *coalification* bahan organik adalah suhu, laju pemanasan, waktu dan tekanan, dengan suhu fosil yang sangat penting. Secara kimia, *coalification* adalah dekomposisi bahan organik seperti pirolisis suhu tinggi suhu rendah jangka panjang dengan pelepasan produk gas secara terus menerus. Temperatur terbentuknya batubara umumnya berkisar antara 100-170°C untuk bituminus, dan 170-275°C untuk Antrasit.

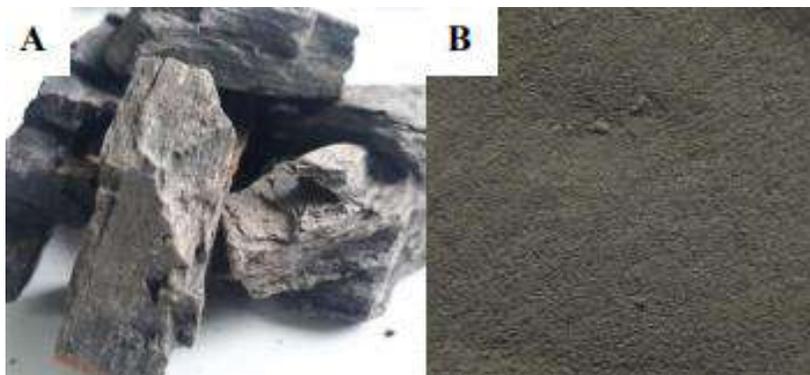
Di bawah tekanan atmosfer (0, 1 MPa), pembentukan batubara dimulai pada suhu 230 °C, menurut data lain pada 280 °C. Namun demikian, peningkatan tekanan secara umum memfasilitasi dekomposisi termal bahan organik dan pirolisis terbatas bertekanan tinggi menghasilkan hasil yang sebanding dengan pematangan alami. Oleh karena itu, jika tekanan meningkat sebesar 25-30 MPa per 1 km kedalaman, dekomposisi bahan organik dapat terjadi pada suhu yang jauh lebih rendah, seperti 120 °C, atau 70 °C, atau 85-95 °C (Straka dan Sy'korova, 2018). Selain itu, tekanan yang lebih tinggi menghasilkan hasil yang lebih tinggi dari fase karbon padat (Noumi *et al.*, 2015).

#### **7.4.2. Karakteristik Batubara Muda**

Sub-bituminus merupakan hasil perubahan lignit dalam tekanan yang lebih tinggi. Batubara jenis Sub-bituminus memiliki warna hitam dengan nilai kalor yang tinggi daripada batubara lignit. Kandungan karbon di dalam batubara ini berkisar 35-45% dan batubara Sub-bituminus memiliki kandungan sulfur yang lebih rendah daripada batubara bituminus serta hasil pembakaran yang lebih bersih (Tekmira, 2006). Nilai kalori jenis Sub-bituminus, berdasarkan American Testing Society for Testing and Material dari 19,3-26,7 MJ/Kg. Berdasarkan nilai kalori, jenis batubara ini dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu Sub-bituminus A, B dan C dengan nilai kalori 19,3-22,1 MJ/Kg; 22,1-24,4 MJ/Kg dan 24,4-26,7 MJ/Kg (ATS, 2009 dalam Maulana 2020).

Morfologi batubara Sub-bituminus (Gambar 7.12 A) dan bubuk batubara Sub-bituminus (Gambar 7.12 B), terlihat bahwa warna bubuk batubara Sub-bituminus yang diidentifikasi dengan buku *Soil Munsell Color Chart* yaitu 10 Y 5/1 (Gray). Secara umum, warna dari batubara yaitu hitam berkilauan (luster) metalik, tergantung dari jenis batubara (Maulana, 2020). Berdasarkan klasifikasi kualitas atau mutu, batubara Sub-bituminus berada pada kelas rendah. Menurut klasifikasi ASTM bahwa batubara Sub-bituminus mempunyai *fixed carbon* (FC) antara 78-86% (*low volatile*) dan rata-rata nilai kalor antara 8.300-13.000 Btu/lb. Selanjutnya, klasifikasi *National Coal Board* (NCB) bahwa batubara Sub-bituminus mempunyai *volatile matter (dry, mineral matter free)* di antara 9,1-19,5% (*coal rank 200/Low Volatile/Steam Coal*) dan klasifikasi

International A B batubara Sub-bituminus disebut dengan jenis *Brown coal* (40-50% abu) (World Coal Institute, 2005).



Gambar 7.12 Morfologi batubara Sub-bituminus (A) dan bubuk batubara Sub-bituminus (B)

Berdasarkan penelitian Rezki (2007), batubara Sub-bituminus yang berasal dari Pasaman, Sumatra Barat dapat dijadikan sebagai bahan organik karena M = Logam mengandung 31,5% bahan humat yang terdiri dari 21% asam humat dan 10,5% asam fulvat yang diekstrak dengan NaOH 0,5 N. Persentase asam humat dari batubara Sub-bituminus (21%) lebih tinggi dibandingkan dengan persentase asam humat yang terkandung dalam bahan organik lainnya, seperti kompos sampah kota (1,4%), pupuk kandang (1,6%), kompos jerami padi (5%), dan tanah gambut (9,2%) (Herviyanti *et al.*, 2005).

Maulana (2020) melakukan karakterisasi batubara Sub-bituminus yang berasal dari kenagarian Ganggo Mudiak, Kecamatan Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatra Barat Indonesia seperti terlihat pada Tabel 7.17, di mana ditemukan bahwa nilai pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl bubuk batubara Sub-bituminus, masing-masing sebesar 5,23 dan 4,63 unit. Hal ini disebabkan dari kandungan asam-asam organik yang tinggi dari bubuk batubara Sub-bituminus. Berdasarkan penelitian Shelly (2014) bahwa nilai pH H<sub>2</sub>O bubuk batubara Sub-bituminus yaitu 5,23 unit. Hal ini terlihat sama dari hasil yang didapatkan. Selanjutnya, nilai KTK bubuk batubara Sub-bituminus sebesar 35,64 cmol(+)/kg. Menurut penelitian Shelly

(2014) nilai KTK bubuk batubara Sub-bituminus sebesar 34,04 cmol(+)/kg. Hal ini dipengaruhi dari struktur aromatik yang dimiliki oleh batubara Sub-bituminus dan diduga sebagai tempat pertukaran ion. Menurut Stemberg *et al.*, (1975) dalam Skodras *et al.*, (2014) bahwa di dalam batubara terdapat adsorpsi kation yang sangat kompleks yang terdiri dari senyawa organik dan anorganik, sehingga hal ini sangat berhubungan dengan KTK batubara. Selanjutnya Kokorotsikos *et al.*, (1986) dalam Skodras *et al.*, (2014) menyatakan bahwa ion hidrogen pada struktur aromatik batubara yang terdiri dari ikatan karbon merupakan tempat pertukaran ion secara permanen.

Tabel 7.17 Karakteristik Sub-bituminus

Sifat kimia	Nilai	Satuan
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	5.23	unit
pH KCl (1:1)	4.63	unit
KTK	35.64	cmol/kg
Kadar Abu	47.51	%
Kadar C	30.70	%
N-Total	0.17	%
P-tersedia	3.58	ppm
Kadar P	0.06	%
Kadar K	0.09	%
Kadar Ca	0.07	%
Kadar Mg	0.04	%
Kadar Na	0.04	%
Kadar S	0.02	%

Sumber: Maulana, 2020

Kadar abu dan C yang dimiliki bubuk batubara Sub-bituminus masing-masing sebesar 47,51% dan 30,70%. Hal ini disebabkan karena jenis dari batubara yang digunakan termasuk ke dalam golongan batubara peringkat rendah dan diduga dipengaruhi oleh proses pembentukan batubara itu sendiri. Menurut Ishak dan Ismail (2003) bahwa batubara Sub-bituminus memiliki 6,16% abu dan 68,00% C. Selanjutnya Gill *et al.*, (2015) menyatakan bahwa batubara Sub-bituminus memiliki kadar abu sekitar 34,90%-46,30% dan kadar C sekitar 33,68%-44,28%.

Kandungan N, P, K, Ca, Mg, Na dan S pada bubuk batubara Sub-bituminus masing-masing sebesar 0,17%; 0,06% (3,58 ppm); 0,09%;

0,07%; 0,04%; 0,04% dan 0,02% (Tabel 7.4.1). Menurut Orem dan Finklelman (2003) bahwa rata-rata kandungan geokimia batubara Sub-bituminus dari Amerika sebesar 1,30% N; 20ppm P; 0,10% K; 0,23% Ca; 0,07% Mg; 0,04% Na dan 1,30% S. Nitrogen dalam gugus fungsional batubara Sub-bituminus dinominasi oleh nitril, namun sedikit dalam bentuk piridin, pirol, amina dan amida. Kandungan nitrogen selama proses pembentukan batubara hanya sedikit berubah, di mana fraksi nitrogen (%) dalam substansi tersebut meningkat yang diawali ketika gambut kehilangan oksigen. Hal ini disebabkan karena gambut sebagai tahap awal dalam pembentukan batubara. Kandungan nitrogen dalam batubara sekitar 0,5-2,0% (Ostman dan Colmsjo, (1988); Stańczyk, (1991); Tingey dan Morrey, 1973 dalam Gil, 2012). Asam amino terikat dari protein (tumbuhan dan bakteri) bersama dengan alkaloid tumbuhan (klorofil dan porfirin lainnya) yang merupakan sebagai sumber nitrogen dalam batubara. N batubara bersifat heterosiklik dari jenis nitrogen pyridinic dan pyrrolic. Perubahan awal nitrogen berasal dari pembentukan gambut hingga ke batubara, di mana total nitrogen meningkat secara signifikan selama pembentukan batubara Lignit dan Sub-bituminus dan kemudian mulai menurun selama pembentukan batubara bituminus (Kimer, (1945); Hauck, (1975); Given, (1984); Boudou *et al.*, 1984 dalam Burchill dan Welch, 1989).

### **7.4.3. Aplikasi Batubara Muda**

Prasetyo *et al.* (2021) melakukan penelitian mengenai potensi dari penggunaan batubara muda sebagai pembenah tanah masam untuk peningkatan pertumbuhan kopi arabika. Hasil penelitian menunjukkan pemberian batubara muda ke tanah masam memberikan efek yang signifikan pada pH, C-Organik, N-total, dan KTK. Pada Tabel 7.18 terlihat bahwa terdapat peningkatan pH sebanyak 1.3 unit dibandingkan kontrol. Peningkatan ini sejalan dengan hasil penelitian dari Cornellissen yang menyebutkan bahwa peningkatan pH terjadi berhubungan dengan muatan negatif pada gugus fungsional dari Sub-bituminus. Pada kandungan C-organik, terlihat pemberian subituminus meningkat dari 0.4 menjadi 3.74%. Selain itu untuk perlakuan formulasi subituminus dan biochar, cenderung terjadi peningkatan C pada formula yang mengandung semakin

banyak Sub-bituminus. Hal ini dikarenakan Sub-bituminus mengandung >30% C-organik, sehingga dapat dijadikan sebagai sumber C-organik tanah.

Tabel 7.18 Sifat Kimia Ultisol setelah pemberian formulasi subituminus dan biochar

Treatment	pH H <sub>2</sub> O	P-ters Ppm	C-Org %	N-tot %	KTK cmol/kg	Kation Basa(cmol/kg)			Al-dd
						K	Ca	Mg	
Kontrol	4.17 <sup>f</sup>	5.25 <sup>d</sup>	0.40 <sup>f</sup>	0.36 <sup>e</sup>	10.11 <sup>d</sup>	0.66 <sup>c</sup>	1.41 <sup>b</sup>	1.78 <sup>c</sup>	3.19
100% SBC	5.47 <sup>a</sup>	6.35 <sup>c</sup>	3.74 <sup>a</sup>	0.48 <sup>a</sup>	20.98 <sup>a</sup>	1.03 <sup>b</sup>	2.61 <sup>a</sup>	2.34 <sup>bc</sup>	nd
75% SBC+ 25% BB	4.84 <sup>c</sup>	6.52 <sup>bc</sup>	3.30 <sup>b</sup>	0.46 <sup>ab</sup>	17.10 <sup>b</sup>	1.10 <sup>ab</sup>	2.87 <sup>a</sup>	2.77 <sup>ab</sup>	nd
50% SBC+ 50% BB	4.74 <sup>d</sup>	7.00 <sup>a</sup>	1.63 <sup>c</sup>	0.45 <sup>ab</sup>	19.15 <sup>a</sup>	1.17 <sup>a</sup>	2.78 <sup>a</sup>	3.05 <sup>a</sup>	nd
25% SBC+ 75% BB	4.66 <sup>e</sup>	6.58 <sup>b</sup>	1.51 <sup>d</sup>	0.41 <sup>bc</sup>	11.78 <sup>cd</sup>	1.02 <sup>b</sup>	2.69 <sup>a</sup>	2.51 <sup>ab</sup>	nd
100% BB	5.30 <sup>b</sup>	6.40 <sup>bc</sup>	1.20 <sup>e</sup>	0.40 <sup>bc</sup>	12.90 <sup>c</sup>	1.10 <sup>ab</sup>	2.70 <sup>a</sup>	3.14 <sup>a</sup>	nd

SBC: Sub-Bituminus Coal, BB: Biochar Bamboo

Sumber: Prasetyo *et al.* (2021)

Kemudian untuk N-total, terjadi peningkatan yang signifikan dibandingkan kontrol sebanyak 0.12% dengan pemberian Sub-bituminus. Hal ini dikarenakan kandungan N dari subituminus dan gugus fungsional karboksil dan fenol yang dapat mengikat N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Peningkatan KTK tanah yang signifikan, sebanyak 10.87 cmol/kg, ditemukan pada pemberian Sub-bituminus.

Keaktifan bubuk batubara muda Sub-bituminus dilihat dari meningkatnya nilai KTK, di mana nilai KTK bubuk batubara muda Sub-bituminus tanpa diaktifkan sebesar 34,04 me/100 g (Shelly, 2014). Jika nilai KTK tinggi setelah diaktifkan dengan jenis bahan pengaktif pilihan (Urea 125% rekomendasi, KCl 125% rekomendasi, NaOH 0,25 N dan NaCl 0,25 N) maka diharapkan dapat memengaruhi ciri kimia tanah lainnya seperti pH tanah, mengurangi kelarutan Al sehingga meningkatkan kandungan P tanah dan meningkatkan kandungan hara tanah lainnya. Oleh karena itu, perlunya proses pengaktifan menggunakan jenis bahan pengaktif pilihan tersebut. Shelly (2014) menyatakan bahwa pemberian bubuk batubara muda Sub-bituminus yang diaktifkan dengan Urea 125% rekomendasi, KCl 125% rekomendasi, NaOH 0,25 N dan NaCl 0,25 N

merupakan dosis pencampuran terpilih yang memiliki ciri kimia bubuk batubara tertinggi pada tanah Oxisol.

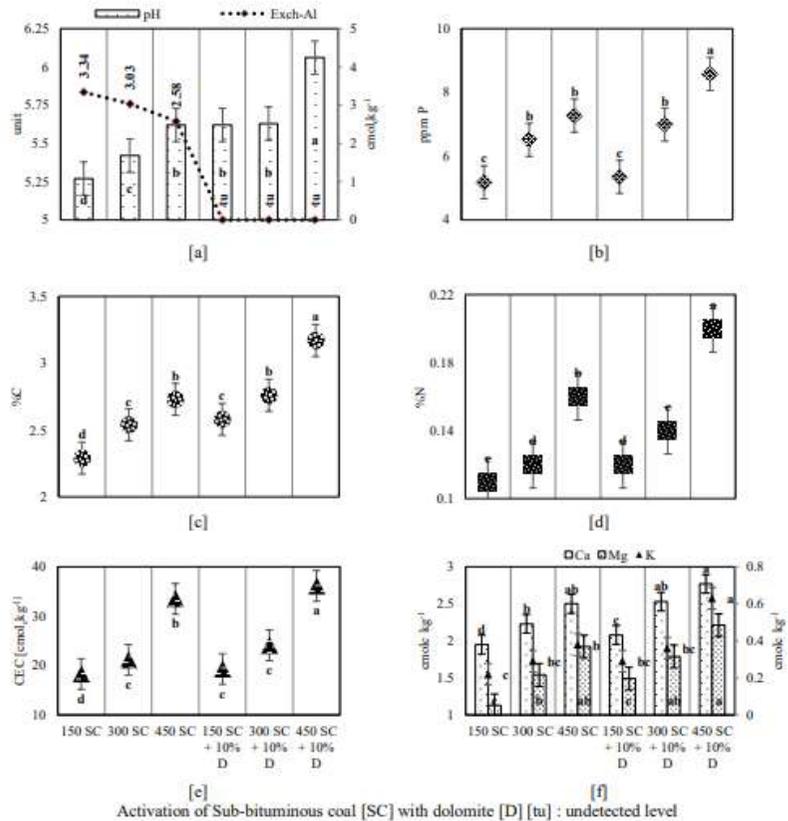
Herviyanti *et al.* (2013) memperoleh hasil yang optimal dibanding dengan beberapa takaran persen lainnya yaitu dengan mencampurkan rekomendasi Urea sebanyak 125% dengan bubuk batubara didapatkan pH yang relatif netral 7,25; nilai KTK yang cukup tinggi yaitu 60,68 me/100 g dan kelarutan relatif tinggi yaitu 12,37%. Sedangkan dengan rekomendasi KCl 125% dapat melarutkan bubuk batubara sampai 10%; nilai KTK 61,27 me/100 g; kelarutan 10,13% dan pH 4,17. Selanjutnya menggunakan senyawa NaOH yang merupakan pelarut yang kuat melarutkan bahan humat dari batubara muda dengan konsentrasi 0,25 N didapatkan KTK 86,58 me/100 g, kelarutan 18,25% dan pH 9,75. Sedangkan pelarut selanjutnya yaitu NaCl dengan konsentrasi 0,25 N didapatkan KTK 61,124 me/100 g, kelarutan 7,87% dan pH 4,47.

Maulana (2016) juga melakukan penelitian mengenai aktivasi bubuk batubara dengan beberapa pengaktif yaitu Urea, KCl, NaOH dan NaCl guna memperbaiki sifat kimia Ultisol. Penelitian ini didasarkan pada Hasil dari penelitian tersebut ditemukan bahwa pemberian bubuk batubara muda takaran 1% (setara 20 ton/ha) dapat memperbaiki sifat kimia Ultisol pada C-Organik, N-total, KTK, K-dd dan P-tersedia. Perbaikan sifat kimia tersebut meliputi 0.45% C; 0.06%N; 7.25 me/100 g KTK; 0.17% K; 4.51 ppm P, dibandingkan dengan takaran 0.25%. Kemudian, dengan aktivasi bubuk batubara dengan Urea 125% dapat memperbaiki sifat kimia Ultisol pada pH, Al-dd, C-Organik, n-Total, KTK, dan P-tersedia, di mana perbaikannya masing-masing 1.03 unit; 1.03 me/100 g Al; 0.71% C; 0.13% N; 18.82 me/100 g KTK; 6.39 ppm P, dibandingkan dengan tanpa bahan pengaktif.

Maulana (2020) melakukan penelitian mengenai pengaruh aktivasi batubara menggunakan berbagai jenis kapur [ $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Ca(CO)}_3$  dan  $\text{CaMg(CO)}_3$ ] terhadap sifat kimia Ultisol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivasi batubara 30 ton/ha dengan 10%  $\text{CaMg(CO)}_3$  memberikan kandungan tertinggi pada C dan P-tersedia dengan nilai 3.06% dan 8.89 ppm.

Herviyanti *et al.* (2021) melakukan penelitian menggunakan batubara muda yang diaktivasi menggunakan kapur dolomit. Batubara

yang diaktivasi dengan kapur dolomit dapat meningkatkan pH, C-organik, P-Tersedia dari Ultisol sebanyak 0.163 unit; 0.36% C; 2.22 ppm P dan dapat menurunkan Al<sub>d</sub> sebanyak 0.87 cmol/kg, meningkatkan N-total dari kelapa sawit pada tahap pra-pembibitan sebesar 0,034% N dibandingkan dengan yang tanpa aktivator (Prasetyo *et al.*, 2018). Pengaruh dari pemberian batubara muda yang diaktifkan dengan dolomit pada Ultisol dapat dilihat pada Gambar 7.13.



Gambar 7.13 Pengaruh subituminus yang diaktivasi dengan dolomit pada (a) pH dan Al<sub>d</sub>; (b) P-tersedia; (c)C-Organik; (d) N-total; (e) KTK dan (f) Kation Basa pada Ultisol (Herviyanti *et al.*, 2021)

Peningkatan pH berhubungan dengan meningkatnya dosis batubara muda dan dengan proses aktivasi menggunakan kapur dolomit. Pada gambar, dapat dilihat pada pengaplikasian 450 g batubara muda + 10% kapur dolomit adalah perlakuan terbaik dalam meningkatkan pH tanah dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini dikarenakan pada aktivasi batubara muda dengan dolomit dapat mendonasikan ion OH pada larutan tanah. Kapur yang terhidrolisis akan menghasilkan hidroksil yang dapat menurunkan kemasaman tanah. Hal ini bertolak belakang dengan kandungan Al-dd pada Ultisol di mana menurun dari 3.34 menjadi tidak terdeteksi yang berarti pemberian perlakuan tersebut menurunkan Al-dd. Selain itu, perlakuan tersebut juga meningkatkan kandungan P-Tersedia, C-Organik dan N-Total dari Ultisol sebanyak 1.31 ppm P, 0.44% C dan 0.04% yang berbeda dari perlakuan lainnya. Peningkatan P terjadi karena meningkatnya pH dan menurunnya Al pada tanah melalui proses aktivasi yang terjadi. Dengan meningkatnya pH tanah, jumlah muatan negatif koloid tanah akan lebih tinggi bersamaan dengan berkurangnya adsorpsi P.

Selanjutnya, peningkatan kandungan C Organik dengan aktivasi dengan dolomit dapat mengaktifkan karbon dalam SC melalui disosiasi  $H^+$  dalam ikatan fenol dan karboksil. Proses aktivasi yang dilakukan dengan dolomit terhadap SC sebagai bahan organik juga dapat memaksimalkan distribusi N dalam SC ke dalam tanah. Pada Gambar 7.13e, dapat dilihat bahwa SC yang diaktifkan oleh dolomit mampu meningkatkan kandungan CEC sebesar 2,62 cmol/kg, dibandingkan tanpa aktivasi pada 450 g SC dan merupakan pengobatan terbaik dibandingkan dengan perawatan lainnya. Hal ini juga terlihat bahwa 450 g SC diaktifkan dengan dolomit dapat meningkatkan K, Ca, dan ExchMg pada Ultisol sebesar 0,25; 0,27, dan 0,29 cmol/kg-1 dibandingkan tidak diaktifkan pada 450 g SC [Gambar 7.13]. Dengan meningkatnya muatan negatif di tanah, kemampuan untuk menyerap dan bertukar kation juga lebih tinggi.

### **7.5. Bahan Organik Terhumifikasi**

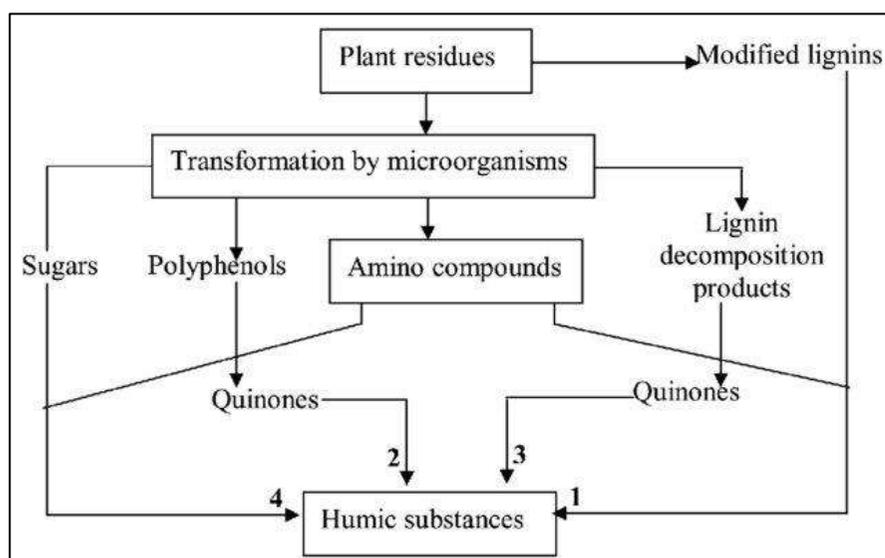
Bahan organik terhumifikasi atau humus adalah bahan organik yang mengalami humifikasi dan merupakan hasil akhir dari proses dekomposisi bahan organik. Bahan ini bersifat stabil dan tahan terhadap biodegradasi. Asam humat adalah asam organik yang tersedia secara alami dalam tanah

yang mendorong pertumbuhan dan hasil tanaman dengan meningkatkan status nutrisi. Ini adalah produk ramah lingkungan alami yang ada di semua tanah secara alami, air tawar, limbah lumpur, kompos dan ekosistem laut, dengan struktur molekul yang kompleks. Tumbuhan dan hewan yang telah mati mengalami serangkaian proses dekomposisi yang melibatkan banyak organisme tanah seperti jamur, bakteri, protozoa, nematoda, cacing tanah dan serangga. Dalam jangka waktu yang lama bahan-bahan yang membusuk ini, setelah beberapa siklus dekomposisi, berubah menjadi humus atau zat humat melalui proses humifikasi. Humus adalah senyawa stabil berwarna kuning, coklat atau hitam dengan berat molekul bervariasi, yang tidak dapat mengalami dekomposisi lebih lanjut. Zat humat terdiri dari asam humat, asam fulvat dan humin. Asam humat adalah makromolekul yang lebih aktif dan kaya karbon. Asam humat adalah produk transformasi pertama dari bahan organik tanah, sedangkan asam fulvat selanjutnya dibentuk oleh transformasi tambahan. Secara kimiawi, asam humat adalah kompleks polimer unit fenolik dan aromatik, dengan asam amino atau unit polisakarida (Schnitzer, 2002; Ghosh *et al.*, 2011 dalam Nagachandrabose dan Baidoo, 2021). Ini tersedia dalam berbagai bentuk seperti *leonardite*, *potassium humate*, *ammonium humate* and *magnesium humate* yang berasal dari lignit dan tambang batubara.

### **7.5.1. Proses Pembentukan Humus**

Bahan humus adalah serangkaian senyawa dengan berat molekul tinggi secara alami, yang merupakan komponen utama bahan organik di tanah dan perairan. Degradasi bakteri dan kimia dari lignin (zat yang disimpan dalam membran sel yang membantu memberikan dukungan dan kekakuan tanaman) dan dari karbohidrat struktural lainnya dalam tanaman bertanggung jawab untuk membangun produk intermediet humus, seperti asam amino, aromatik, asam lemak dan asam organik. Produk intermediet ini kemudian dipolimerisasi dengan adanya polifenol. Metabolit ini dapat dioksidasi menjadi kuinon baik secara spontan dengan adanya oksigen molekuler atau secara enzimatik, dimediasi oleh berbagai macam mikroorganisme. Karena polifenol dari degradasi tanaman terlibat dalam pembentukan humus, asam fenolik (asam pirokatekis, asam vanilat, vanilin, resorsinol, asam ferulat dan asam benzoat) kemudian akan

berkontribusi bagian penting pada struktur humus. Asam fenolik ini memiliki setidaknya satu gugus karboksil (-COOH) dan satu gugus fenolik hidroksil (-OH). Ini adalah kelompok fungsional yang bertanggung jawab atas kapasitas chelating mineral Asam Humat dan Asam Fulvat. Senyawa fenolik, kuinon dan protein terkondensat oleh aksi mikroorganisme tanah pada karbohidrat tanah. Ini membantu membentuk struktur dan komposisi asam humat dan fulvat dan dengan demikian bahan humus (Moreda-Piñeiro *et al.*, 2004; Wersahw, 1989; Gramss *et al.*, 1999; Williams dan Jackson, 2002; Aiken *et al.*, 1985; Gramss *et al.*, 1999 dalam Ouni *et al.*, 2014) (Gambar 7.14).



Gambar 7.14 Mekanisme pembentukan bahan humat (Stevenson 1982 dalam Ouni *et al.*, 2014). (1) *theory of Lignin*, (2, 3) *theory of polyphenols* and (4) *theory of amino-saccharidic condensation*

### 1. *Theory of Lignin (way formation 1)*

Ini adalah teori klasik yang didefinisikan oleh Waksman (1932 dalam Ouni *et al.*, 2014) yang berhipotesis bahwa pembentukan HS dimulai dari lignin yang dimodifikasi (Gambar 7.14). Komponen terakhir adalah biopolimer yang mudah terurai secara hayati yang terdiri dari perakitan tiga jenis unit fenilpropanoïd yang terhubung di antara mereka

oleh berbagai jenis koneksi C-C dan etil oksida. Proses ini terdiri dari kombinasi molekul lignin yang dimodifikasi dengan komponen nitrogen dari tipe protein (senyawa amino) yang disintesis oleh mikro-organisme (Stenvenson, 1994 dalam Ouni *et al.*, 2014), menurut reaksi berikut:  
(Modified lignin)-CHO + RNH<sub>2</sub> → (modified lignin)-CH=NR + H<sub>2</sub>O

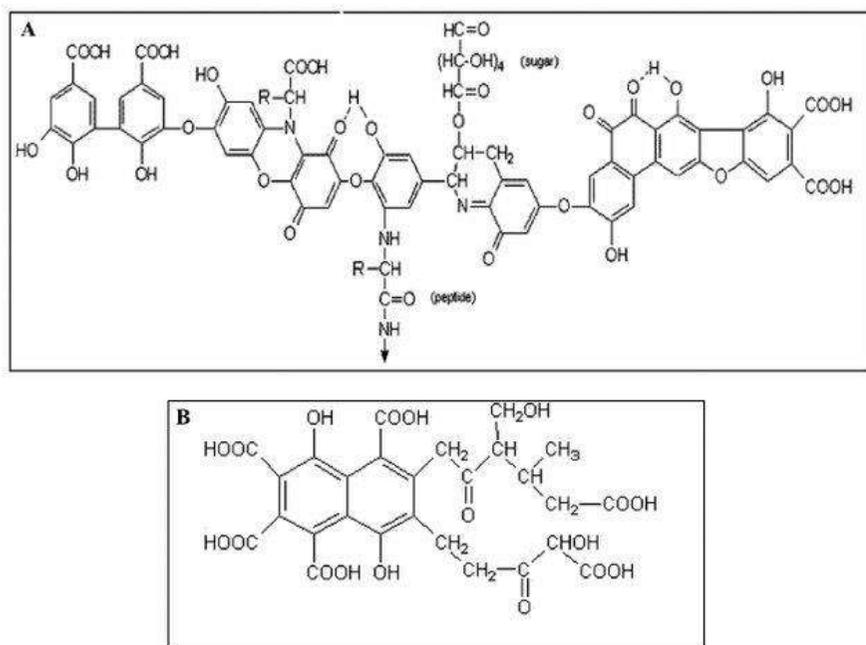
Dengan demikian, lignin tidak lengkap digunakan oleh mikro-organisme, karena soliditas strukturnya (koneksi stabil C-C) dan, sebagai akibatnya, residunya menjadi bagian penyusun humus tanah (Saiz-Jimenez *et al.*, 1989 dalam Ouni *et al.*, 2014).

## 2. *Theory of polyphenols (ways formation 2 and 3)*

Menurut teori polifenol, bahan humus dapat dianggap sebagai kombinasi biopolimer yang dihasilkan dari degradasi tanaman dan komponen organik lainnya (cara nomor 2). Juga dalam kasus ini, pembentukan bahan humus terjadi sebagai akibat dari transformasi oleh mikroorganisme (Peña-Méndez *et al.*, 2005 dalam Ouni *et al.*, 2014). Menurut cara 3 (Gambar 7.14), lignin yang dilepaskan dari ikatannya dengan selulosa, selama dekomposisi residu sayuran, mengalami degradasi dan dipecah menjadi unit struktural utamanya (unit fenilpropena). Komponen terakhir ini kemudian didemetilasi dan dioksidasi dari polifenol. Asam dan aldehida fenolik, yang dihasilkan dari lignin selama serangan mikroba, diubah menjadi kuinon oleh enzim spesifik, khususnya polifenoloksida, yang menghilangkan atom hidrogen dengan OH fenolik. Kuinon kemudian dipolimerisasi atau digabungkan kembali dengan senyawa nitrogenisasi untuk membentuk makromolekul humat (Huang, 2000 dalam Ouni *et al.*, 2014). Cara 2 mengikuti prinsip serupa dari cara 3 pembentukan bahan humus. Namun, satu-satunya perbedaan adalah bahwa polifenol disintesis oleh mikro-organisme mulai dari tidak ada sumber karbon berkayu (misalnya selulosa, tetapi juga dari tidak ada sumber nabati). Oksidasi polifenol bakteri ini dalam kuinon juga menyebabkan pembentukan bahan humus.

### 3. Theory of amino-saccharidic condensation (way formation 4)

Mriailard (1913 dalam Ouni *et al.*, 2014) mengusulkan kombinasi pengurangan gula dan amina untuk menjelaskan pembentukan bahan humus. Ini dikenal sebagai reaksi kompleks yang menerapkan senyawa yang menyajikan pengelompokan pereduksi (aldehida atau ketonik) dan senyawa amino yang bereaksi satu sama lain untuk menghasilkan zat aromatik dan berwarna. Senyawa dengan pengelompokan karbonil (C=O) dapat berupa karbohidrat (gula) atau produk oksidasi lipid dan fungsi amina berasal dari asam amino itu sendiri, protein atau amina alami atau eksogenik. Gula dan asam amino yang dihasilkan dari metabolisme mikroba dan degradasi dari bahan organik dipolimerisasi oleh kondensasi abiotik (Anderson *et al.*, 1989; Jokic *et al.*, 2001 dalam Ouni *et al.*, 2014). Berikut dapat dilihat komponen dari bahan humus:



Gambar 7.15 Komposisi unsur zat humat (A: asam humat, B: asam fulvat)  
(Stevenson, 1982)

Struktur kimia bahan humus tidak sederhana dan dikenal (Yang *et al.*, 2004). Namun, Cheshire *et al.* (1967 dalam Ouni *et al.*, 2014) menunjukkan bahwa struktur utama bahan humus adalah inti aromatik polisiklik yang terkait dengan struktur rantai samping, seperti fenolik karbohidrat, protein, peptida, dan ion logam. Istilah bahan humus digunakan sebagai nama generik untuk menggambarkan bahan berwarna atau fraksinya yang diperoleh berdasarkan karakteristik kelarutan (Moreda-Piñeiro *et al.*, 2004 dalam Ouni *et al.*, 2014). Bagaimanapun, menurut sifat-sifat ini bahan humus dibagi menjadi tiga fraksi asam humat, asam fulvat dan humin, yang digambarkan sebagai berikut:

1. Asam Humat

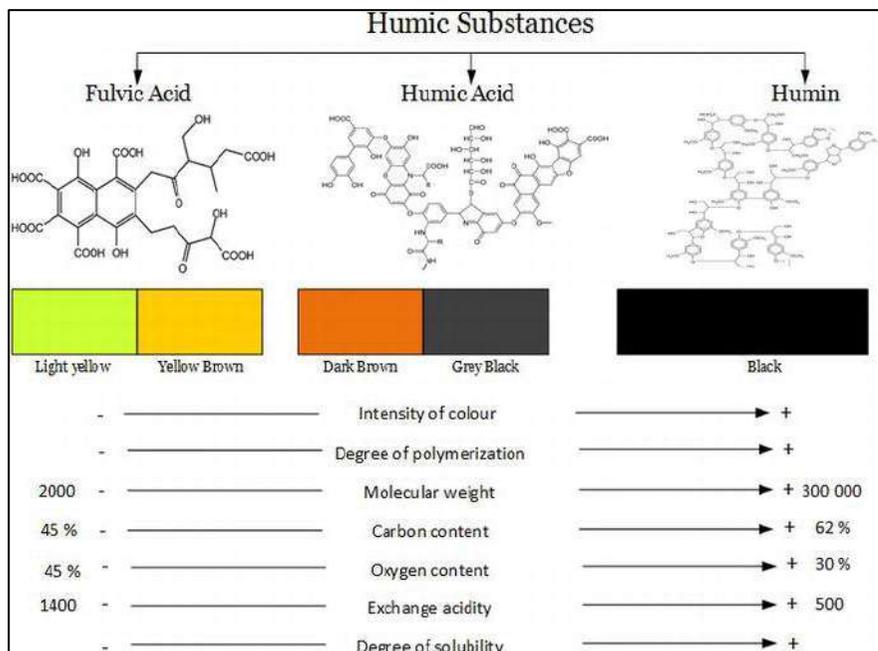
Asam humat adalah konstituen polimer cokelat hingga hitam dari tanah. Mereka terdiri dari lignit dan gambut, mengandung struktur aromatik dan heterosiklik, gugus karboksil dan nitrogen (Stevenson, 1982; Mosley dan Mosley, 1998 dalam Ouni *et al.*, 2014). Komposisi unsur mereka dilaporkan pada Gambar 7.15 A. Fraksi bahan humus ini secara alami terbentuk dari dekomposisi zat seluler dan bertindak untuk menguraikan dinding sel dan bahan perekatan (hidrokarbon) dalam kehidupan tanaman yang membusuk. Asam humat merupakan fraksi bahan humus yang tidak larut dalam air dalam kondisi asam ( $\text{pH} < 2$ ) tetapi larut pada nilai pH yang lebih tinggi (Chung *et al.*, 2005). Mereka dapat diekstraksi dari tanah oleh berbagai reagen dan mereka tidak larut dalam asam encer. Asam humat adalah komponen utama yang dapat diekstraksi dari bahan humus tanah.

2. Asam Fulvat

Asam fulvat adalah penyusun humus tanah berwarna oranye terang hingga cokelat. Bahan-bahan alami ini terbentuk dari dekomposisi bahan seluler dan bertindak sebagai chelator alami mineral dan logam dalam tanah dengan komposisi unsur seperti yang terlihat pada Gambar 7.15 B. Bahan memasuki rantai makanan dan larut dalam larutan asam. Asam fulvat adalah fraksi bahan humus yang larut dalam air dalam semua kondisi pH. Mereka tetap dalam larutan setelah menghilangkan asam humat dengan pengasaman (Mosley dan Mosley, 1998; Eyheraguibel *et al.*, 2008 dalam Ouni *et al.*, 2014).

### 3. Humin

Humin adalah fraksi bahan humus yang tidak larut dalam air pada nilai pH apa pun). Bahkan tidak larut dalam media alkali. Ini didegradasi secara perlahan oleh aktivitas mikroba tanah dan memengaruhi tanah dengan mengatur nilai tukar ion kapasitas penahan air, konduktivitas listrik dan pH (Kulikova *et al.*, 2005; Mosley dan Mosley, 1998 dalam Ouni *et al.*, 2014). Warna zat humin hitam di tanah humus.



Gambar 7.16 Karakteristik kimia dari bahan humat (Gautam *et al.*, 2021)

#### 7.5.2. Karakteristik Bahan Organik Terhumifikasi

Bahan humat dapat diperoleh dari berbagai jenis bahan organik terutama dari yang telah terdekomposisi sempurna seperti pupuk kandang, kompos sampah kota, kompos jerami padi, dan tanah gambut, tetapi kadar dari bahan humat yang diperoleh sedikit sekali yaitu < 10%. Herviyanti (2010), menjelaskan bahwa asam humat dari pupuk kandang hanya 1,5%, kompos sampah kota 1,4%, kompos jerami padi 5% dan dari tanah gambut

9,2%. Hasil penelitian Rezki (2007), memperoleh 31,5% bahan humat dari batubara muda (Sub-bituminus) Kabupaten Pasaman dan 15,4% bahan humat dari batubara muda (Sub-bituminus) Kota Sawahlunto yang diekstrak dengan 0,5 N NaOH. (Herviyanti *et al.*, 2012).

### **7.5.3. Aplikasi Bahan Organik Terhumifikasi**

Pada penelitian Herviyanti *et al.* (2012), pemberian bahan humat berbeda nyata terhadap nilai pH H<sub>2</sub>O dan Al-dd tanah. Pada takaran bahan humat 800 dan 1200 ppm terjadi peningkatan pH tanah masing-masing sebesar 0,12 dan 0,15 unit dan penurunan Al-dd sebesar 0,38 dan 0,62 me/100 g dibanding tanpa bahan humat. Hal dikarenakan bahan humat merupakan hasil akhir dekomposisi bahan organik, muatan negatif dan gugus fungsional dari bahan humat (gugus karboksil (COO<sup>-</sup>) dan fenolat (OH<sup>-</sup>)) membentuk senyawa kompleks atau khelat dengan Al, sehingga kelarutan Al di dalam tanah berkurang dan kemungkinan untuk terjadinya hidrolisis Al berkurang juga berkurang. Sehingga terjadi peningkatan pH tanah dan penurunan nilai Al-dd tanah. Sejalan dengan Huang dan Schnitzer (dalam Herviyanti *et al.*, 2012) dengan peningkatan takaran asam humat maka terjadi pula peningkatan gugus fungsional asam humat, sehingga dapat membentuk kompleks melalui gugus fungsional (-COOH) dan phenolic (-OH) dengan Al<sup>3+</sup> dalam jumlah yang cukup banyak. Akibatnya Al<sup>3+</sup> yang dapat dipertukarkan menjadi berkurang. Tan (2010) menyatakan bahwa Al yang terjerap oleh kompleks liat dapat terhidrolisis dan menghasilkan ion H<sup>+</sup>, sehingga konsentrasi ion tersebut meningkat di dalam tanah. Dengan terbentuknya kompleks antara Al dengan asam organik maka reaksi hidrolisis Al dapat dihalangi. Selanjutnya Rezki (2009) pada Oxisol menunjukkan bahwa penggunaan asam humat dari batubara muda (Sub-bituminus) dapat meningkatkan nilai pH dari sangat masam (3,68) menjadi masam (5,13) pada dosis 2% C-organik.

Pemberian bahan humat takaran 400 ppm dapat meningkatkan P-tersedia tanah sebesar 10,67 ppm dibandingkan tanpa bahan humat. Kandungan P tanah meningkat seiring dengan peningkatan takaran bahan humat yang diberikan. Bahan humat berperan dalam meningkatkan ketersediaan P yaitu dengan mencegah terjadinya interaksi logam Al dan Fe dengan ion P melalui reaksi kompleks dan khelat sehingga P yang ada

di dalam tanah dilepaskan dan pada waktu penambahan pupuk, unsur P sudah tidak difiksasi oleh Al dan Fe kemudian dapat larut, dan tersedia bagi tanaman (Herviyanti *et al.*, 2012). Menurut Tan (2010), asam humat dan asam fulvat dapat meningkatkan pembebasan dan daya larut P anorganik yang tidak larut melalui proses pengkkelatan.

Semakin tinggi takaran bahan humat yang diberikan semakin tinggi pula KTK tanah. Pemberian bahan humat takaran 400, 800 dan 1200 ppm meningkatkan KTK tanah masing-masing sebesar 6,83; 8,42 dan 9,93 me/100 g. Pemberian bahan humat akan menyebabkan jumlah gugus fungsional seperti karboksil  $-COOH$  dan phenolic  $-OH$  meningkat, sehingga sumber muatan negatif akan meningkat pula. Artinya peningkatan jumlah muatan negatif pada koloid tanah menyebabkan KTK tanah akan meningkat pula (Herviyanti *et al.*, 2012). Hal ini didukung oleh pernyataan Stevenson (1982), bahwa asam humat memiliki KTK 300-1400 me/100 g, sehingga melalui pemberian bahan humat dapat meningkatkan kemampuan tanah dalam menjerap dan mempertukarkan kation.

Pemberian bahan humat 400, 800 dan 1200 ppm dapat meningkatkan kandungan C-organik tanah masing-masing sebesar 0,75%, 0,99%, 1,89% dibanding tanpa bahan humat. Peningkatan C-organik ini dipengaruhi oleh tingginya konsentrasi C-organik pada batubara yang diekstrak menjadi bahan humat yang ditambahkan ke dalam tanah yaitu sebesar 22,26% (Herviyanti *et al.*, 2012).

## **7.6. Biochar**

### **7.6.1. Sumber dan Produksi Biochar**

Berbagai jenis bahan organik atau limbah organik yang sulit terdekomposisi atau didekomposisi karena mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin yang tinggi dapat dijadikan sebagai sumber bahan baku (*feedstock*) biochar baik berupa limbah pertanian, peternakan, perkebunan maupun biomassa. Limbah pertanian seperti sekam padi, tongkol jagung, batang ubi kayu, sedangkan limbah perkebunan seperti limbah buah kelapa muda, tempurung dan sabut kelapa, kulit kakao, cangkang/tempurung kelapa sawit, dan bahan jenis lainnya merupakan bahan baku biochar yang melimpah ketersediaannya di Indonesia, dan belum dimanfaatkan secara optimal. Di samping itu bahan baku biochar

dapat pula berasal dari biomasa seperti kayu dan rantingnya serta bambu (Herviyanti *et al.*, 2023).

Kayu dapat menghasilkan biochar yang berkualitas tinggi dan risiko polusi kecil, tetapi masalah deforestasi menjadi isu yang sangat mengkhawatirkan karena penggundulan hutan untuk mendapatkan kayu sebagai bahan bakar, konstruksi, dan industri mebel sehingga adanya peningkatan nilai jual dan kelangkaan kayu. Alternatif *feedstock* yang dapat digunakan adalah bambu karena bambu tumbuh paling cepat, memberikan biomassa kayu yang sangat tinggi dalam waktu yang sangat singkat, tumbuh kembali setelah panen; juga penstabil tanah; limbah bambu dari konstruksi dan lain-lain juga dapat digunakan (Herviyanti *et al.*, 2023).

Beberapa metode pirolisis telah dikembangkan mulai dari yang sederhana sampai metode dengan teknologi yang memadai. Pirolisis tradisional menggunakan lobang tanah (*soil pit*) dapat menghasilkan emisi asap yang besar dan senyawa beracun/polusi. Secara konvensional masyarakat Indonesia banyak memproduksi biochar menggunakan drum yang relatif mudah dilaksanakan dan tidak memerlukan keahlian yang khusus, namun metode ini juga menghasilkan asap yang banyak dan rendemen biochar yang rendah. Metode Kontiki merupakan alternatif metode yang efektif karena terbukti menjadi metode produksi biochar yang bersih, menghasilkan biochar dengan sangat cepat (45 menit sampai 2 jam) dengan rendemen yang cukup tinggi (15-25%) dan biaya minimum (Herviyanti *et al.*, 2023).

Sejalan dengan berkembangnya teknologi proses pembuatan biochar dilakukan dengan menggunakan berbagai alat pirolisis seperti metode kombinasi drum dengan kon-tiki dan pirolisator model ISRI SS1 dan SS2. Di samping itu dikembangkan pula pirolisator model retort seperti Adam Retort Klin (ARK), Retort karbonasi bambu di China dan Jepang, Tungku logam di Afrika, dan berbagai jenis pirolisator lainnya yang telah menggunakan teknologi yang canggih untuk memproduksi biochar, arang dan asap cair (Herviyanti *et al.*, 2023).

### 7.6.2. Aplikasi Biochar

Biochar telah terbukti memiliki manfaat sebagai bahan pembenah tanah dan dapat meningkatkan kualitas lahan pertanian, mengurangi sampah biomassa dan dapat mengurangi tingkat keasaman tanah. Selain penggunaan biochar secara langsung, aplikasi di lahan pertanian dapat meningkatkan pendapatan petani dengan hasil panen yang meningkat dan mengurangi pencemaran tanah dan air akibat pencucian pupuk di tanah (Widiastuti dan Lantang, 2017).

Biochar diidentifikasi sebagai *soil conditioner* yaitu suatu bahan yang ditambahkan ke dalam tanah untuk memperbaiki pertumbuhan dan hasil tanaman. Keuntungan utama pemberian biochar pada tanah terletak pada dua pilar, yaitu daya retensinya yang sangat tinggi terhadap unsur hara dan sifat persistennya yang sangat tinggi di dalam tanah. Pemberian biochar idealnya dicampurkan secara merata pada lapisan olah tanah atau ditempatkan dekat permukaan tanah di perakaran di mana tempat berlangsungnya siklus unsur hara dan penyerapan oleh tanaman guna meningkatkan kesuburan tanah. Pemberian biochar dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui perbaikan sifat fisik tanah, meningkatkan pH tanah dan retensi kation pada zona perakaran tanaman (Situmeang, 2020).

Herviyanti (2020-2022) melakukan penelitian di Lapangan berlokasi di daerah Belimbing, Padang, dengan indikasi tanah berupa tanah mineral masam yaitu Ultisol. Dilakukan aplikasi beberapa biochar (bambu, sekam padi, dan limbah buah kelapa muda) dengan metode pirolisis yang berbeda (kontiki, drum, dan soil pit). Pada tahun pertama, dilakukan penambahan biochar setara 10 ton/ha dan ditanami dengan jagung pakan. Selanjutnya, dilakukan penambahan biochar setara 10 ton/ha dan ditanami dengan kedelai edamame. Terakhir, dilihat residu dari penambahan total 20 ton/ha biochar tersebut dan ditanami dengan jagung manis.

Biochar bambu yang diberikan ke tanah dengan beberapa metode pirolisis sebelumnya mampu memberikan hasil yang baik pada sifat kimia Ultisol. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengukuran pH tanah yang awalnya 4,87 menjadi 5,50 dengan perlakuan biochar bambu (BB) Kon-Tiki, 5,28 untuk perlakuan BB Drum, dan 5,38 untuk perlakuan BB *Soil-pit*. Nilai P-tersedia dalam tanah meningkat dari 4,01 ppm menjadi 7,06 ppm dengan

perlakuan biochar bambu (BB) Kon-Tiki, 6,61 ppm untuk perlakuan BB Drum, dan 6,24 ppm untuk perlakuan BB *Soil-pit*. Nilai C-organik dan KTK tanah meningkat dari 0,46% dan 17,18 cmol/kg menjadi 1,16% dan 25,35 cmol/kg dengan perlakuan biochar bambu (BB) Kon-Tiki, 1,00% dan 23,20 cmol/kg untuk perlakuan BB Drum, 0,86% dan 22,91 cmol/kg untuk perlakuan BB *Soil-pit*. K-dd meningkat dari 1,39 cmol/kg menjadi 2,19 cmol/kg untuk perlakuan BB Kon-Tiki, 1,99 cmol/kg untuk BB Drum dan 1,88 cmol/kg untuk BB *Soil-pit*. Kandungan Ca-dd dan Mg-dd meningkat dari 2,09 cmol/kg dan 3,75 cmol/kg menjadi 4,07 cmol/kg dan 5,09 cmol/kg untuk metode Kon-Tiki, 3,80 cmol/kg dan 4,71 cmol/kg untuk metode drum, 3,56 cmol/kg dan 4,50 cmol/kg untuk metode *soil-pit* (Herviyanti *et al.*, 2020).

Kemudian Fitriani (2021) melakukan penelitian lanjutan dengan menambahkan kekurangan 10 ton/ha dari penelitian sebelumnya. Hasil penelitian menunjukkan residu 10 ton/ha biochar bambu dan penambahan 10 ton/ha biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis mampu memperbaiki sifat kimia Ultisol jika dibandingkan dengan kontrol. Penambahan total 20 ton/ha biochar bambu dapat meningkatkan pH tanah dari 4,53 menjadi 5,50 unit, Al-dd tidak terukur dari sebelumnya 2,62 cmol/kg, P-tersedia dan C-Organik meningkat dari 4,57 ppm dan 0,74% menjadi 7,72 ppm 1,40%, K-dd, Ca-dd, dan Mg-dd mengalami peningkatan dari sebelumnya 1,54 cmol/kg, 2,34 cmol/kg, 3,65 cmol/kg menjadi 2,22 cmol/kg, 4,11 cmol/kg, 5,13 cmol/kg. Serta peningkatan KTK dari 16,81 cmol/kg menjadi 30.83 cmol/kg.

Tabel 7.19 Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap pH H<sub>2</sub>O dan Kandungan Al-dd Ultisol

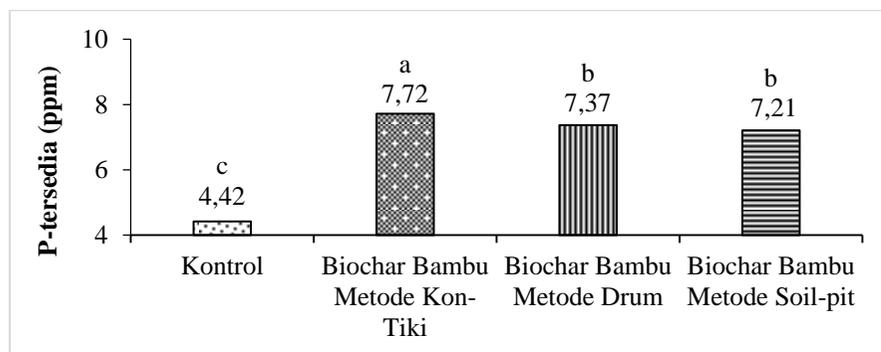
Perlakuan	pH H <sub>2</sub> O (unit)	Al-dd (cmol/kg)
Kontrol	4,53 c	3,02
Biochar Bambu Metode Kon-Tiki	5,50 a	tu
Biochar bambu Metode Drum	5,28 b	tu
Biochar bambu Metode <i>Soil-pit</i>	5,38 b	1,08

tu: tidak terukur

Aplikasi biochar bambu dengan metode Kon-Tiki memberikan peningkatan nilai pH sebesar 0,97 unit dibandingkan dengan kontrol dan

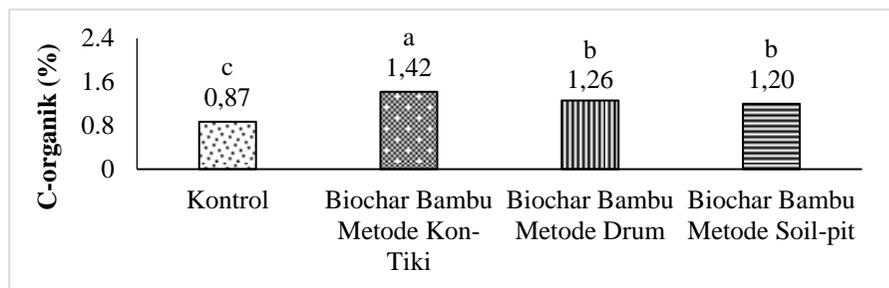
terjadi peningkatan 0,85 unit antara biochar bambu metode drum dan *soil-pit* dibandingkan dengan kontrol. Meningkatnya pH Ultisol dengan adanya aplikasi biochar bambu disebabkan biochar memiliki kemampuan untuk menetralkan pH tanah. Hal ini sesuai dengan pendapat Niswati *et al.* (2017) yang menyatakan biochar bersifat alkalis dan terjadinya hidrolisis ion-ion basa yang terdapat di dalam biochar sehingga menghasilkan ion OH<sup>-</sup> yang dapat menetralkan pH tanah. Selain itu, pemberian biochar menyebabkan peningkatan nilai pH karena Al yang merupakan sumber kemasaman Ultisol mengalami penurunan konsentrasi.

Aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis mampu menurunkan kandungan Al-dd pada Ultisol hingga menjadi tidak terukur (tu) pada metode Kon-Tiki dan drum serta menurunkan Al-dd sebesar 1,94 cmol/kg jika dibandingkan dengan kontrol. Menurunnya kandungan Al-dd diduga karena terjadinya peningkatan pH pada Ultisol (Tabel 7.17). Menurut Putri *et al.* (2017), meningkatnya pH pada tanah masam akibat pemberian biochar disebabkan terjadinya peningkatan senyawa oksida pada biochar di mana hal ini menyebabkan konsentrasi Al menurun di dalam tanah. Selain karena terjadinya peningkatan pH, menurunnya konsentrasi Al juga disebabkan oleh terbentuknya kompleks antara Al dan gugus fungsional yang ada pada permukaan biochar sehingga terjadi pengurangan konsentrasi Al di dalam tanah (Qian *et al.*, 2013).



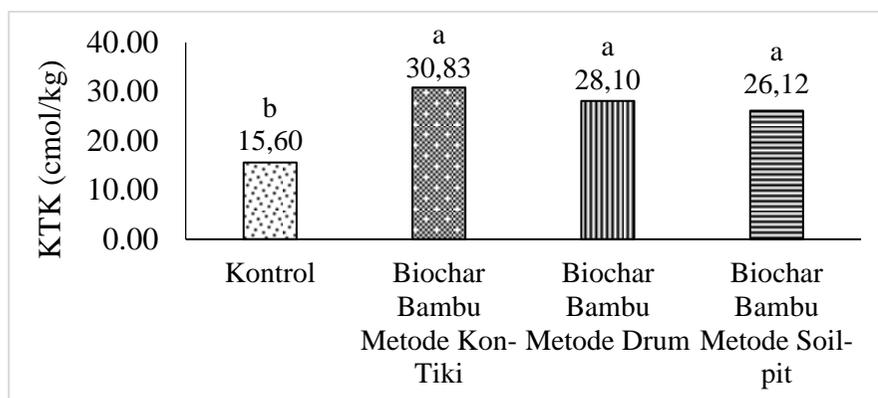
Gambar 7.17 Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap P-tersebut Ultisol

Aplikasi biochar bambu dengan metode Kon-Tiki, metode drum dan metode *soil-pit* memberikan peningkatan P-tersedia dibandingkan dengan kontrol sebesar 3,33 ppm, 2,95 ppm dan 2,79 ppm. Meningkatnya P-tersedia Ultisol berbanding lurus dengan meningkatnya pH tanah (Gambar 7.17). Hal ini sesuai dengan pendapat Latuponu *et al.* (2012) yaitu meningkatnya ketersediaan P disebabkan oleh meningkatnya pH tanah sebagai akibat dari terjadinya reaksi antara ion  $Al^{3+}$  dengan  $OH^-$  yang membentuk senyawa  $Al(OH)_3$  (Al mengendap) sehingga P terlepas dari ikatan Al-P dan tersedia di tanah.



Gambar 7.18 Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap C-organik Ultisol

Aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis mampu meningkatkan kandungan C-organik Ultisol berbeda sangat nyata dibandingkan dengan kontrol. Peningkatan kandungan C-organik dengan aplikasi biochar bambu metode Kon-Tiki, biochar bambu metode drum dan biochar bambu metode *soil-pit* masing-masing jika dibandingkan dengan kontrol sebesar 0,53%, 0,39% dan 0,33%. Meningkatnya C-organik pada Ultisol disebabkan oleh adanya sumbangan C-organik yang berasal dari biochar bambu (Gambar 7.6.2). Menurut Aulia (2018), pembuatan biochar dengan proses pembakaran yang tidak sempurna menghasilkan gugus fungsional dengan kandungan karbon yang tinggi sehingga biochar mempunyai kemampuan untuk menyumbangkan karbon yang lebih besar jika dibandingkan dengan bahan organik lainnya.



Gambar 7.19 Pengaruh aplikasi biochar dengan beberapa metode pirolisis terhadap KTK Ultisol

Peningkatan nilai KTK oleh aplikasi biochar bambu metode Kon-Tiki, metode drum dan metode *soil-pit* masing-masing jika dibandingkan dengan kontrol sebesar 15,23 cmol/kg, 12,50 cmol/kg dan 10,52 cmol/kg. Meningkatnya KTK pada Ultisol disebabkan oleh luasnya permukaan dan banyaknya muatan negatif pada biochar yang menyebabkan semakin banyak kation-kation yang dapat dijerap sehingga terjadi peningkatan KTK tanah. Menurut Liang *et al.* (2008), pengaplikasian biochar pada tanah dapat meningkatkan KTK tanah melalui 2 mekanisme yaitu adanya luas permukaan yang lebih tinggi dari permukaan biochar untuk penjerapan kation dan adanya kepadatan muatan negatif yang lebih tinggi yang berasal dari biochar. Meningkatnya KTK tanah sejalan dengan meningkatnya nilai pH Ultisol (Gambar 7.19) di mana terjadi peningkatan muatan negatif pada tanah yang menyebabkan tanah mampu menyerap kation-kation basa seperti K, Ca dan Mg yang pada akhirnya meningkatkan nilai KTK tanah.

Aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis mampu meningkatkan kandungan K-dd sangat berbeda nyata jika dibandingkan dengan kontrol. Aplikasi biochar bambu metode Kon-Tiki, metode drum dan metode *soil-pit* masing-masing memberikan peningkatan sebesar 0,85 cmol/kg, 0,72 cmol/kg dan 0,69 cmol/kg dibandingkan dengan kontrol terhadap K-dd Ultisol. Meningkatnya kandungan K-dd Ultisol disebabkan oleh adanya sumbangan K yang berasal dari biochar (Putri *et al.*, 2017).

Kandungan K pada biochar bambu metode Kon-Tiki, drum dan *soil-pit* masing-masing 356,81 mmol/kg, 321,61 mmol/kg dan 244,02 mmol/kg (Tabel 7.20). Selain itu biochar juga mampu mengurangi pencucian ion K<sup>+</sup> sehingga lebih tersedia pada tanah (Sukartono dan Utomo, 2012).

Aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis mampu meningkatkan kandungan Ca-dd Ultisol berbeda sangat nyata dibandingkan dengan kontrol. Peningkatan kandungan Ca-dd dengan aplikasi biochar bambu metode Kon-Tiki, metode drum dan metode *soil-pit* masing-masing sebesar 2,01 cmol/kg, 1,86 cmol/kg dan 1,73 cmol/kg dibandingkan dengan kontrol. Meningkatnya kandungan Ca-dd disebabkan oleh adanya sumbangan Ca yang berasal dari biochar. Hal ini sejalan dengan pendapat Shetty dan Prakash (2020) yaitu basa-basa yang terdapat di dalam biochar seperti Ca, Mg dan K dilepaskan ke dalam larutan tanah sehingga basa-basa yang dapat dipertukarkan akan meningkat. Kandungan Ca pada biochar bambu metode Kon-Tiki, drum dan *soil-pit* masing-masing sebesar 152,12 mmol/kg, 101,97 mmol/kg dan 88,93 mmol/kg (Tabel 7.20).

Tabel 7.20 Pengaruh aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap K-dd, Ca-dd dan Mg-dd Ultisol

Perlakuan	K-dd	Ca-dd	Mg-dd
	-----cmol/kg-----		
Kontrol	1,37 b	2,10 c	3,53 d
Biochar Bambu Metode Kon-Tiki	2,22 a	4,11 a	5,13 a
Biochar Bambu Metode Drum	2,09 a	3,96 ab	4,74 b
Biochar Bambu Metode <i>Soil-pit</i>	2,06 a	3,83 b	4,52 c

Aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis menunjukkan peningkatan terhadap kandungan Mg-dd Ultisol sangat berbeda nyata dibandingkan dengan kontrol. Peningkatan Mg-dd dengan aplikasi biochar bambu metode Kon-Tiki, metode drum dan metode *soil-pit* masing-masing sebesar 1,60 cmol/kg, 1,21 cmol/kg dan 0,99 cmol/kg dibandingkan dengan kontrol. Meningkatnya kandungan Mg-dd Ultisol disebabkan oleh adanya sumbangan unsur Mg yang berasal dari biochar (Tabel 7.20). Hal ini didukung oleh pendapat Lehmann dan Joseph (2009) yakni arang hayati yang berasal dari proses pembakaran secara pirolisis

menghasilkan karbon aktif yang mengandung mineral di antaranya adalah Ca, Mg dan karbon organik yang apabila diberikan ke tanah akan meningkatkan kandungan Ca, Mg dan karbon organik tanah.

Fitriani (2021) menyimpulkan bahwa residu 10 ton/ha biochar bambu dan penambahan 10 ton/ha biochar bambu dengan metode Kon-Tiki merupakan perlakuan terbaik yang mampu meningkatkan pH Ultisol sebesar 0,97 unit, P-tersedia 3,33 ppm, C-organik 0,53%, K-dd, Ca-dd, dan Mg-dd masing-masing 0,85 cmol/kg, 2,01 cmol/kg dan 1,60 cmol/kg, KTK tanah 15,23 cmol/kg dan mampu menurunkan kandungan Al-dd hingga tidak terukur dibandingkan dengan kontrol (Tabel 7.19, Gambar 7.17, 7.18, 7.19, dan Tabel 7.20)

Penelitian lainnya menemukan bahwa biochar bambu dapat meningkatkan kandungan karbon tanah, meningkatkan kesuburan tanah dan mengembalikan tanah yang terdegradasi. Situmeang *et al.* (2018) meneliti efektivitas bambu-biochar yang dikombinasikan dengan pupuk kompos dan NPK terhadap peningkatan kualitas tanah menggunakan rancangan acak kelompok (RAK) dengan dua faktor, tiga ulangan. Faktor pertama adalah dosis biochar (empat tingkat), yaitu tanpa biochar, dosis biochar 5,26 ton/ha, dosis biochar 10,52 ton/ha, dosis biochar 15,78 ton/ha. Faktor kedua adalah jenis pupuk dengan empat jenis, yaitu: tanpa pupuk, kompos, NPK, dan kompos+NPK. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis biochar 10,52 ton/ha yang dikombinasikan dengan kompos (20.22 ton/ha) dan NPK (313.37 kg/ha) dapat meningkatkan ketersediaan P (32,89 ppm lebih tinggi dari tanpa biochar dan pupuk, 14,04 ppm lebih tinggi dari tanpa biochar (hanya Kompos dan NPK) dan K (802.95 ppm lebih tinggi dari tanpa biochar dan pupuk, 605.67 ppm lebih tinggi dari tanpa biochar (hanya kompos dan NPK), meningkatkan total mikroba tanah ( $3.72 \times 10^6$  cfu/ml), dan meningkatkan kualitas tanah menjadi sangat baik dengan nilai SQR 18.

Hu *et al.* (2023) meneliti tentang pengaruh biochar dalam N-Tanah dan keberagaman bakteri dengan beberapa dosis biochar yaitu 0% (CK), 0.5% (BC1), 1.0% (BC2), 2.0% (BC3), dan 4.0% (BC4). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan nitrogen total (TN) dan nitrogen amonium (AN) dalam tanah meningkat masing-masing sebesar 4,7-32,3% dan 8,3-101,5%. Kandungan nitrogen biomassa mikroba (MBN) meningkat dengan

meningkatnya jumlah dosis biochar. Aplikasi biochar juga secara signifikan mengubah komposisi komunitas bakteri tanah. Jumlah salinan gen penanda 16S dari enzim terkait dengan proses nitrifikasi pada BC2 berkurang sebesar 20,1%. Namun, ekspresi gen nitrat oksida reduktase dan dinitrogen oksida reduktase pada BC3 meningkat masing-masing sebesar 16,4% dan 16,0%, dibandingkan dengan yang ada di CK. AN, nitrat nitrogen (NN), dan NN/TN adalah faktor utama yang memengaruhi struktur komunitas bakteri tanah. Selain itu, ekspresi nitrit reduktase, hidroksilamin, dan nitrat oksida reduktase (sitokrom c) juga berkorelasi secara signifikan. Oleh karena itu, biochar yang diaplikasikan meningkatkan ketersediaan nitrogen tanah dan yang pada akhirnya menghasilkan penurunan risiko lingkungan dengan penghambatan pelepasan nitrogen tanah.

Biochar juga dapat diaplikasikan bersama dengan bahan organik lainnya, seperti kompos, pupuk kandang, dan pupuk hijau. Listyarini *et al.* (2023) mengombinasikan biochar biji kelapa sawit dengan kompos tithonia pada beberapa dosis untuk meningkatkan respons hidrologi dan hasil jagung pada Ultisol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan (5 ton/ha Biochar dan 5 ton/ha kompos) dan perlakuan (7,5 ton/ha kompos & 2,5 ton/ha Biochar) menunjukkan peningkatan laju dan kapasitas infiltrasi yang lebih signifikan, serta permeabilitas tanah, dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Selain itu, perlakuan (5 ton/ha biochar dan 5 ton/ha kompos) terbukti meningkatkan hasil jagung sebesar 80,53%, sedangkan perlakuan (2,5 ton/ha biochar & 7,5 ton/ha kompos) menghasilkan peningkatan panen 80%.

## DAFTAR PUSTAKA

---

- Aulia, Y. 2018. Pemanfaatan Biochar Ampas Tebu Sebagai Amelioran Untuk Perbaikan Sifat Kimia Inceptisol yang Ditanami Tebu di Kenagarian Lawang, Kabupaten Agam [Skripsi]. Padang. Fakultas Pertanian. Universitas Andalas. 71 hal.
- Balai Penelitian Tanah. (2020). Turi mini *Sesbania rostrata* dan *Azolla* dapat mensubstitusi sebagian pupuk nitrogen. [Balittanah.litbang.pertanian.go.id/index.php/301-nitro](http://Balittanah.litbang.pertanian.go.id/index.php/301-nitro). Diakses 5 Agustus 2023
- Barus, L.E. 2005. Pengaruh pemberian pupuk hijau dan fosfat alam terhadap pertumbuhan dan produksi kedelai (*Glycine max* (L.) Merr) panen muda dengan sistem pertanian organik. Skripsi. Institut Pertanian Bogor. Bogo
- Bidai, T.D.T., Lelei, J.J., and Ouma, J.P. 2020. Effect of sugarcane bagasse ash and manure amendments on selected soil properties in Western Kenya. *African Journal of Agricultural Research* 16(11):1554-1561.
- Bot, A and Benites, J. 2005. The Impotance of Soil Organic Matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production. *FAO Soils Bulletin* **80**.
- Burchill, P., and L. S. Welch. 1989. Variation of Nitrogen Content and Functionality with Rank for Some UK Bituminous Coals. *Fuel*, 68(1), 100-104.
- Cahyono, P., Loekito, S, Wiharso, D., Afandi, Rahmat,A, Nishimura, N, dan Senge, M. 2020. Effect of Compost on Soil Properties and Yield of Pineapple (*Ananas comusus* L.Merr) on Red Acid Soil, Lampung, Indonesia. *International Journal of GEOMATE* 19(76): 33-39
- Cai, Y., He, Y., He, K., Gao, H., Ren, M., and Qu, G. 2019. Degradation mechanism of lignocellulose in dairy cattle manure with the addition of calcium oxide and superphospate. *Environmental Science and Pollution Research* 26:33683-33693.
- Chen D, Ye X, Jiang Y, Xiao W, Zhang Q, Zhao S, Shao S, Gao N, Huang M and Hu J (2022) Continuously applying compost for three years

- alleviated soil acidity and heavy metal bioavailability in a soil-asparagus lettuce system. *Front. Plant Sci.* 13:972789
- Chimdi, A., Gebrekidan, H., Kibret, K. and Tadesse, A. (2012) Effects of Liming on Acidity-Related Chemical Properties of Soils of Different Land Use Systems in Western Oromia, Ethiopia. *World Journal of Agricultural Sciences*, 8, 560-567.
- Chukwuka, K.S., S. Ogunyemi, I. Fawole. 2007a. Ecological distribution of *Tithonia diversifolia* (Hemsl). A. Gray-a new exotic weed in Nigeria. *J. Biol. Sci* 7:709-719.
- Chung, K.H., Choi, G.S., Shin, H.S., Lee, C.W., 2005. Vertical distribution and characteristics of soil humic substances affecting radionuclide distribution. *J. Environ. Radioactiv.* 79, 369-379
- Crespo, G., T.E. Ruiz, J. Alvarez. 2011. Effect of green manure from *Tithonia* (*T. diversifolia*) on the establishment and production of forage of *P. purpureum* cv. Cuba CT-169 and on some soil properties. *J. Agric. Sci.* 45:79-82.
- Dabney, SM, Delgado, JA, Meisinger, JJ, Schomberg, HH, Liebig, MA, Kaspar, T, Mitchell, J, dan Reeves, W. 2011. Using Cover Crops and Cropping Systems for Nitrogen Management in *Advances in Nitrogen Management*. (pp 246) Soil and Water Conversation Society: Ankeny
- Dahlianah, I. 2014. Pupuk Hijau Salah Satu Pupuk Organik Berbasis Ekologi dan Berkelanjutan. *Klorofil* 9(2): 54-56.
- Desyrakhmawati, L., Melati, M., Suwanto, dan Hartatik W. 2015. Pertumbuhan *Tithonia diversifolia* dengan Dosis Pupuk Kandang dan Jarak Tanam yang Berbeda. *J. Agron. Indonesia* 43 (1): 72-80.
- Doltra, J.; Gallejones, P.; Olesen, J.E.; Hansen, S.; Frøseth, R.B.; Krauss, M.; Stalenga, J.; Jończyk, K.; Martínez-Fernández, A.; Pacini, G.C. Simulating soil fertility management effects on crop yield and soil nitrogen dynamics in field trials under organic farming in Europe. *Field Crop. Res.* 2019, 233, 1-11
- Echo community. 2019. *Sesbania*. Diakses melalui <https://www.echocommunity.org/en/resources/171a5040-bc48-48d6-aebd-0cf49e6e714e> pada 10 April 2023

- Energy Education. 2015. Coal Formation. Diases melalui [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal\\_formation](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal_formation) pada 9 Mei 2023.
- Fischer, D dan Glaser, B. 2012. Sinergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In book: Management of Organic Waste. page 169.
- Fitriani, A. 2021. Aplikasi biochar bambu dengan beberapa metode pirolisis terhadap ultisol dan produksi tanaman edamame (*Glycine max L. Merr*) pada musim kedua. Skripsi. Padang: Universitas Andalas.
- Fließbach, A.; Oberholzer, H.-R.; Gunst, L.; Mäder, P. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2007, 118, 273-284.
- Gautam, R.K., Navaratna, D., Muthukumar,S., Singh, A., Islamuddin and More, N. 2021. Humic Substances: Its Toxicology, Chemistry and Biology Associated with Soil, Plants and Environment. Interchopen 98518
- Gil, S. 2012. Fuel-N Conversion to NO, N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> During Coal Combustion. *Fossil Fuel and the Environment*, 304. <https://doi.org/10.5772/38176>
- Gill, A. N., M. Akbar., M. A. Qadir., M. Pervaiz., and A. Adnan. 2015. Chlorine Dioxide Mediated Oxidation of Sub-Bituminous Coal for Humic Acid Production. *Asian Journal of Chemistry*, 27(10), 3658-3662
- Glio, M. Tosin. 2015. Pupuk Organik dan Pestisida Nabati. Jakarta: PT Agro Media Pustaka
- Hakim, N, Darfis, I, dan Arfania,L. 2007. Efek Sisa Dan Tambahan Titonia Terhadap Sifat Kimia Ultisol Dan Hasil Tanaman Jagung Pada Musim Tanam Ketiga. *J. Solum* 4(1): 29-39
- Hakim, N., Agustian, Y. Mala. 2012. Application of organic fertilizer *Tithonia plus* to control iron toxicity and reduce commercial fertilizer application on new paddy field. *J. Trop Soils* 17:135-142.

- Hakim,N, Herviyanti dan Meirita, A. 2006. Pengaruh Penambahan Titonia Terhadap Sifat Kimia Ultisol Danhasil Tanaman Kedelai Pada Musim Tanam Ke Tiga. *J. Solum* **3**: 48-58
- Hartatik, W. 2007. Tithonia diversifolia sumber pupuk hijau. *Warta Penelitian Pengembangan Pertanian* 29:3-5.
- Hartatik, W. dan Widowati, L.R. 2006. Pupuk Kandang. Dalam buku “Pupuk Organik dan Pupuk Hayati” halaman 59-82 diakses melalui [http://balittanah.litbang.pertanian.go.id/ind/dokumentasi/buku/buku%20pupuk%20hayatipupuk%20organik/04pukan\\_wiwiki.pdf](http://balittanah.litbang.pertanian.go.id/ind/dokumentasi/buku/buku%20pupuk%20hayatipupuk%20organik/04pukan_wiwiki.pdf)
- Hartatik, W., L.R. Widowati. 2006. Pupuk Kandang. hal 59-82. Dalam R.D.M. Simanungkalit, D.A.Suriadikarta, R. Saraswati, D. Setyorini, W. Hartatik (Eds.). *Pupuk Organik dan Pupuk Hayati*. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor
- Herviyanti, Ahmad, A., Sofyani, R., Darmawan, Gusnidar, dan Saidi, A, 2012. Pengaruh Pemberian Bahan Humat Dari Ekstrak Batubara Muda (Subbituminus) Dan Pupuk P Terhadap Sifat Kimia Ultisol Serta Produksi Tanaman Jagung (*Zea mays* L.). *J. Solum* 9(1): 15-24
- Herviyanti, Maulana A., Prasetyo, T.B., Darfis, I., Hakim, L., and Ryswaldi, R. 2021. Activation of sub-bituminous coal with dolomite to improve chemical properties and palm oil growth on ultisols. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **741** 012032.
- Herviyanti, Maulana, A. Lita, A.L., Monikasari, M., dan Fathi, A.N.M. 2023. *Ameliorasi Tanah Tercemar Berbasis Biochar*. Yogyakarta: Deep Publish
- Herviyanti, T.B. Prasetyo, A. Alif, dan M. A. Tjandra. 2005. Upaya Pengendalian Keracunan Besi (Fe) dengan Asam Humat dan Pengelolaan Air Untuk Meningkatkan Produktifitas Tanah Sawah Bukaan Baru. Laporan Penelitian hibah bersaing. Oktober 2005. 47 hal
- Herviyanti, T.B. Prasetyo, F. Ahmad, and Darmawan. 2010. The Properties of Humic Acids Extracted From Several Sources Of

- Organic Matters And Their Ability To Bind  $Fe^{2+}$  at New Established Ricefield. *Journal of Tropical Soils* 15(3): 237-244.
- Herviyanti, Yulnafatmawita, T. B. Prasetyo, Aprisal, M. Harianti, Z. Naspendra dan A. Maulana. 2020c. Aplikasi Biochar Bambu dengan 3 Metode Produksi dan Biochar Sekam Padi dan Limbah Kelapa Muda untuk Meningkatkan Kesuburan Ultisol Terhadap Tanaman Jagung (*Zea mays* L.). Laporan Penelitian.
- Herviyanti, Yusnaweti, T. B. Prasetyo, M. Harianti. 2013. Kajian Stabilitas Bubuk Batubara Terhadap Produktifitas dan Bahan Humatnya Dalam meningkatkan Produksi Oxisol dan Ultisol. *Laporan Penelitian KKP3N*. 48 hal.
- Holland, J.E., Bennett, E.A., Newton, A.C., White, P.J., McKenzie, B.M., George, T.S., Pakeman, R.J., Bailey, J.S., Fornara, D.A. and Hayes, R.C. (2017) Liming Impacts on Soils, Crops and Biodiversity in the UK: A Review. *Science of the Total Environment*, 610-611, 316-332
- Hu, T. Wei, J. Du, L., Chen, J., and Zhang, J. 2023. The effect of biochar on nitrogen availability and bacterial community in farmland.
- Huang, P.M. dan Schnitzer, M. 1997. Interaction of soil minerals with natural organics and microbes. SSSA Special Publication Number 17. Soil Science Society of America, Inc. 920 p
- Ishak, M. A. M., K. Ismail., M. A. M. Nawi., and A. F. Ismail. 2017. Chemical Desulphurisation of Sub-Bituminous High Sulphur Indonesian Coal Via Peroxyacetic Acid Treatment. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 20(1), 27
- Kabango, F., John, B., Onesimus, S., Lenssen, A.W., Majaliwa, M.J.G. and Stewart, K. (2022) Effect of Applying Low Rates of Agricultural Lime and Chicken Manure on Selected Soil Properties on Ferralsols of Lake Victoria Agro-Ecological Zone, Uganda. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 11, 240-257.
- Kumar, S.; Patra, A.K.; Singh, D.; Purakayastha, T.J. Long-term chemical fertilization along with farmyard manure enhances resistance and resilience of soil microbial activity against heat stress. *J. Agron. Crop Sci.* 2014, 200, 156-162

- Kurniansyah, D. 2010. Produksi kedelai organik panen kering dari dua varietas kedelai dengan berbagai jenis pupuk organik. Skripsi. Institut Pertanian Bogor. Bogor
- Kurniati, F. 2020. Potensi pupuk hijau turi mini (*Sesbania rostrata* Brem) dalam Bidang pertanian. *Media Pertanian* 5(1):10-19.
- Kusumawati, A. 2021. Buku ajar: Kesubuean Tanah dan Pemupukan. Yogyakarta: Poltek LPP Press
- Latuponu, H., D. Shiddieq, A. Syukur dan E. Hanudin. 2012. Pemanfaatan Limbah Sagu Sebagai Bahan Aktif Biochar Untuk Meningkatkan P-tersedia dan Pertumbuhan Jagung di Ultisol. *Jurnal Pembangunan Pedesaan* 12(2): 136-143.
- Lehmann, J dan S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management*. USA: Earthscan. 416 p.
- Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, S. Sohi, J. E. Thies, J. O. Skjemstad, F. J. Luizao, M. H. Engelhard, E. G. Neves dan Wirick. 2008. Stability of Biomass drived Black Carbon in Soil. *Geochimika et Cosmochimica Acta* 72: 6069-6078.
- Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, S. Sohi, J. E. Thies, J. O. Skjemstad, F. J. Luizao, M. H. Engelhard, E. G. Neves dan Wirick. 2008. Stability of Biomass drived Black Carbon in Soil. *Geochimika et Cosmochimica Acta* 72: 6069-6078.
- Lin, H.; Jing, C.M.; Wang, J.H. The influence of long-term fertilization on soil acidification. *Adv. Mater. Res.* 2014, 955-959, 3552-3555.
- Listyarini, D., Endriani, and Pasaribu, F., 2023. The effectiveness combinations of palm kernel biochar and tithonia compost on improving hydrological response and corn yield in Ultisol. *J-PEN Borneo: Journal of Agricultural Sciences* 6(1): 23-33
- Maitra, S., Zaman A., Mandal, T.K., and Palai, J.B. 2018. Green manures in agriculture: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7(5): 1319-1327.
- Maulana, A. 2016. Aktivasi Bubuk Batubara Muda Subbituminus Dengan Urea, KCl, NaOH dan NaCl Untuk Memperbaiki Sifat Kimia Ultisol dan Meningkatkan Produksi Tanaman Jagung (*Zea mays* L.). *Skripsi*. Padang: Universitas Andalas

- Maulana,A. 2020. Aktivasi Bubuk Batubara Sub-bituminus Dengan Berbagai Jenis Kapur Terhadap Sifat Kimia Ultisol. *Tesis*. Padang: Universitas Andalas
- Meena, A.L., Karwal, M., Dutta, D., and Mishra R.P. 2021. Composting: Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting. *Agriculture and Food: E-Newsletter* 3(1): 85-90
- Melsasail, L., Warouw, V.R.C, dan Kamagi, Y.E.B. 2019. Analisis Kandungan Unsur Hara Pada Kotoran Sapi Di Daerah Dataran Tinggi Dan Dataran Rendah. *Jurnal Cocos Universitas Sam Ratulangi* (2):6
- Nagachandrabose, S and Baidoo, R. 2021. Humic acid-a potential bioresource for nematode control. *Nematology* 0(0): 1-1
- Niswati, A., A. K. Salam, M. Utomo dan M. Suryani. 2017. Perubahan Sifat Kimia Tanah dan Pertumbuhan Tanaman Caisim Akibat Pemberian Biochar Pada Topsoil dan Subsoil Ultisol. Hal 455-463. Di dalam: Seminar Nasional dan Rapat Tahunan Dekan (SEMIRATA) BKS PTN Pertanian Wilayah Barat, 20-21 Juli 2017. Fakultas Pertanian, Perikanan dan Biologi. Universitas Bangka Belitung.
- Noumi ES, Blin J, Valette J, Rousset P (2015) Combined effect of pyrolysis and temperature on the yield and CO<sub>2</sub> gasification reactivity of acacia wood in macro-TG. *Energy Fuels* 29(11):7311-7318
- O'Hallorans, JM, Munoz, MA, and Marquez, PE. 1997. Chicken manure as an amendment to correct soil acidity and fertility. *J. Agric. Univ. P.R.* 81(1-2): 1-8
- Opala, P.A., C.O. Othieno, J.R. Okalebo, P.O. Kisinyo. 2009. Effects of combining organic materials with inorganic phosphorus source on maize yield and financial benefits in western Kenya. *Exp. Agric.* 46:23-34.
- Orem, W. H., and R. B. Finkelman. 2003. Coal formation and Geochemistry. US Geological Survey, VA. USA, 7(pp. 191-222), 1-9
- Ouni, Y., Ghnaya,T., Montemurro, F., Abdelly, Ch., and Lakhdar, A. 2014. The role of humic substances in mitigating the harmful

- effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production* 8(3): 353-374
- Prasetyo, T B, Naspendra, Z, Maulana, A, Solfianti, M, Krisna, S D, dan Herviyanti. 2021. Potential of Biochar bamboo and subbituminous coal as amendment of acid mineral soils for improving the growth of arabica coffee (*Coffea arabica* L) seedlings. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 741 012026.
- Prasetyo, T. B., Herviyanti, Juniarti, Harianti, M., and Panjaitan, N. P. 2018. Activation of Subbituminous Powder with Urea and Dolomite to Improve Nutrient Content of Ultisols and The Growth of Oil Palm [*Elaeis guineensis* Jacq] Seedlings. *Malaysian Journal of Soil Sci.* **22** 147-160.
- Putri, V.I., Mukhlis dan B. Hidayat. 2017. Pemberian Beberapa Jenis Biochar Untuk Memperbaiki Sifat Kimia Tanah Ultisol dan Pertumbuhan Tanaman Jagung. *Jurnal Agroekoteknologi FP USU* 5(4): 824-828.
- Qaswar, M., Huang, J., Ahmed, W., Li, D., Liu, S., Ali, S., Liu, K., Xu, Y., Zhang, L., Liu, L., Gao, J., and Zhang, H. 2019. Long-term green manure rotations improve soil biochemical properties, yield sustainability and nutrient balances in acidic paddy soil under rice-based cropping system. *Agronomy* 9, 780
- Qian, L., B. Chen, and D. Hu. 2013. Effective Alleviation of Aluminium Phytotoxicity by Manure-Derived Biochar. *Environmental Science and Technology* 47: 2737-2745 p
- Rasyid, H.A., Hasanudin, U., and Rakhdiatmoko, R. 2015. Potensi pemanfaatan limbah organik dari pasar tradisional di Bandar Lampung sebagai bahan baku pembuatan kompos dan biogas. *Jurnal kelibangan: Inovasi dan Pembangunan* 3(1): 1-12.
- Rezki, D. 2007. Ekstraksi bahan humat dari batubara muda (Subbituminus) dengan menggunakan 10 jenis pelarut. [Skripsi]. Padang. Fakultas Pertanian. Universitas Andalas. 63 hal.
- Rezki, D. 2009. Pengaruh kompos, asam humat dari batubara muda (Subbituminus) dan pupuk buatan terhadap tanaman tomat (*Lycopersicon esculentum* Mill) pada Oxisol. [Tesis]. Padang. Program Pascasarjana Universitas Andalas.

- Rukshana, F.; Butterly, C.R.; Xu, J.-M.; Baldock, J.A.; Tang, C. Organic anion-to-acid ratio influences pH change of soils differing in initial pH. *J. Soils Sediments* 2013, 14, 407-444
- Shelly, N.W. 2014. Pengujian Tingkat Keaktifan Campuran Bubuk Batubara Subbituminus dengan Urea, KCl, NaOH dan NaCl Terhadap Beberapa Ciri Kimia Oxisol. *Skripsi*. Padang: Universitas Andalas.
- Shetty, R. and N. B. Prakash. 2020. Effect of Different Biochars On Acid Soil and Growth Parameters of Rice Plants Under Aluminium Toxicity. *Scientific Reports* 10: 1-10.
- Shokalu, Adekemi Olubukola, Ojo, Aderemi O. Ezekiel-Adewoyin, Dorcas Tinuke, Akintoye Henry Akinwunmi and Azeez, Jamiu Oladipupo. 2010. Comparing the use of *Tithonia diversifolia* and Compost as soil amendments for growth and yield of *Celosia argentea*. *New York Sains Journal* 3(6): 133-138
- Situmeang, Y.P. 2020. *Biochar Bambu Perbaiki Kualitas Tanah dan Hasil Jagung*. Surabaya: Scopindo Media Pustaka. 138 hal.
- Situmeang, Y.P., Adnyana I.M., Subadiyasa I.N.N., and Merit I.N. 2018. Effectiveness of Bamboo Biochar Combined with Compost and NPK Fertilizer to Improved Soil Quality and Corn Yield. *IJASEIT* 8(5):2241-2248.
- Skodras, G., P. Kokorotsikos., and M. Serafidou. 2014. Cation Exchange Capability and Reactivity of Low-rank Coal and Chars. *Central European Journal of Chemistry*, 12(1), 33-43.
- Srinivasarao, C.; Venkateswarlu, B.; Lal, R.; Singh, A.K.; Kundu, S.; Vittal, K.P.R.; Patel, J.J.; Patel, M.M. Long-term manuring and fertilizer effects on depletion of soil organic carbon stocks under pearl millet-cluster beans-castor rotation in Western India. *Land Degrad. Dev.* 2014, 25, 173-183
- Stevens, C.J.; Dise, N.B.; Gowing, D.J. Regional trends in soil acidification and exchangeable metal concentrations in relation to acid deposition rates. *Environ. Pollut.* 2009, 157, 313-319.
- Stevenson, F. J. 1982. Humus chemistry, genesis, composition, reactions. A Wiley-Interscience and Sons New York. 496 p.

- Straka, P dan Sy´korova, I. 2018. Coalification and coal alteration under mild thermal conditions. *Int. J. Coal Sci. Technol* **5**, 358-373.
- Suhartatik, E. (2010). Prospek Sesbania rostrata sebagai pupuk hijau pada padi sawah. *Balai Besar Penelitian Tanaman Padi. Iptek Tanaman Pangan*, 5(1): 15-30
- Sukartono dan W.H. Utomo. 2012. Peranan Biochar Sebagai Pembenhah Tanah Pada Pertanaman Jagung di Tanah Lempung Berpasir (Sandy Loam) Semiarid Tropis Lombok Utara. *Jurnal Buana Sains* 12(1): 91-98.
- Talakua, S.M. and Kaya, E. 2019. Influence Of Organic Fertilizer Sago Compost on Ultisols Soil Physical Properties Of Telaga Kodok Sub Village In Hitu Village Of Central Maluku District And The Corn (Zea Mays Ceratina) Corps Production. *Science Nature* 2(1): 42-56
- Tan, K. H. 2010. Principles of Soil Chemistry Fourth Edition. CRC Press Tailor and Francis Group. Boca Raton. London. New York. 362 p.
- Tang, C.; Conyers, M.K.; Nuruzzaman, M.; Poile, G.J.; Liu, D.L. Biological amelioration of subsoil acidity through managing nitrate uptake by wheat crops. *Plant Soil* 2011, 338, 383-397
- Tekmira. 2006. Batubara di Indonesia. Puslitbang Teknologi Mineral & Batubara. Jawa Barat.
- Thorup-Kristensen, K.; Dresbøll, D.B.; Kristensen, H.L. Crop yield, root growth, and nutrient dynamics in a conventional and three organic cropping systems with different levels of external inputs and N recycling through fertility building crops. *Eur. J. Agron.* 2012, 37, 66-82.
- Thorup-Kristensen, K.; Magid, J.; Jensen, L.S. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. In *Advances in Agronomy*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2003; Volume 79, pp. 227-302.
- Walida, H., Harahap, D.E., dan Zuhirsyan, M. 2020. Pemberian Pupuk Kotoran Ayam Dalam Upaya Rehabilitasi Tanah Ultisol Desa Janji Yang Terdegradasi. *Jurnal Agrica Ekstensia* 14(1):75-80
- Wandansari, N.R., Soemarno, Suntari, R. and Kurniawan, S. 2023. The role of humic acid from various composts in improving degraded

- soil fertility and maize yield. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 10(2):4245-4254, doi:10.15243/jdmlm.2023.102.4245
- Whalen, JK, Chang,C, Clayton,GW, and Carefoot,JP. 2000. Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils. *Soil Sci. Soc. AM. J.* 64(3): 962-966
- White, J.W. 1918. SOIL ACIDITY AS INFLUENCED BY GREEN MANURES. *Journal of Agricultural Research* 13(3): 171-197
- Widiastuti, M.M.D dan B. Lantang. 2017. Pelatihan Pembuatan Biochar Dari Limbah Sekam Padi Menggunakan Metode Retort Kiln. *Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat* 3(2): 129-135.
- Widowati, L.R., Sri Widati, U. Jaenudin, dan W. Hartatik. 2005. Pengaruh Kompos Pupuk Organik yang Diperkaya dengan Bahan Mineral dan Pupuk Hayati terhadap Sifat-sifat Tanah, Serapan Hara dan Produksi Sayuran Organik. Laporan Proyek Penelitian Program Pengembangan Agribisnis, Balai Penelitian Tanah, TA 2005 (Tidak dipublikasikan).
- Wiratini N.M, Lasia I.K., Maryam, S., dan Retug, N.2017. Pelatihan Membuat Kompos Dari Limbah Pertanian Di Subak Telaga Desa Mas Kecamatan Ubud. *Jurnal Widya Laksana* 3(2):70
- World Coal Institute. 2005. Sumber Daya Batubara Tinjauan Lengkap Mengenai Batubara. <http://www.worldcoal.org>. Diakses pada tanggal 4 April 2023
- Xie, Z.; Tu, S.; Shah, F.; Xu, C.; Chen, J.; Han, D.; Liu, G.; Li, H.; Muhammad, I.; Cao, W. Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in south China. *Field Crop. Res.* 2016, 188, 142-149.
- Xu, J, Yuan, L, Wen, Y, Zhang, S, Li, Y, Mi, G, dan Zhao, B. 2022. Nitrogen and phosphorus replacement value of three representative livestock manures applied to summer maize in the North China Plain. *Agronomy* 12(11):2716
- Yang, H.L., Hseu, Y.C., Hseu, Y.T., Lu, F.J., Lin, E., Lai, J.S., 2004. Humic acid induces apoptosis in human promyelocytic leukemia HL-60 cells. *Life Sci.* 75, 1817-1831

- Yang, Z.; Xu, M.; Zheng, S.; Nie, J.; Gao, J.; Liao, Y.; Xie, J. Effects of long-term winter planted green manure on physical properties of reddish paddy soil under a double-rice cropping system. *J. Integr. Agric.* 2012, 11, 655-664.
- Zahrah, S. 2009. Penentuan Penambatan N<sub>2</sub> Udara dengan Perunut Isotop <sup>15</sup>N pada beberapa jenis tanaman pupuk hijau di tanah masam. *Jurnal penelitian* 8(2):1-6.
- Zhao, X.; Wang, S.; Xing, G. Maintaining rice yield and reducing N pollution by substituting winter legume for wheat in a heavily-fertilized rice-based cropping system of southeast China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2015, 202, 79-89
- Zhu, Q.; Liu, X.; Hao, T.; Zeng, M.; Shen, J.; Zhang, F.; Vries, W. De Modeling soil acidity in typical Chinese cropping systems. *Sci. Total Environ.* 2018, 613-614, 1339-1348.

## BAB VIII

---

# TEKNOLOGI AMELIORASI TANAH MINERAL MASAM DENGAN BAHAN ANORGANIK

### 8.1. Kapur

Kapur secara alami berasal dari batu kapur. Batu kapur merupakan mineral yang terbentuk secara alami yang pada dasarnya terdiri dari kalsium karbonat. Sebagian dari kalsium karbonat mungkin telah diubah menjadi dolomit melalui penggantian dengan magnesium karbonat sebagai komponen sekunder (hingga 46% berat). Banyak batu kapur yang sangat murni, dengan kurang dari 5% pengotor non-karbonat (Herman, 2019). Batu kapur ditemukan dalam berbagai bentuk dan diklasifikasikan berdasarkan asal-usul, komposisi kimia, struktur, dan formasi geologisnya. Batu kapur ditemukan secara luas di seluruh dunia, dan merupakan bahan baku penting bagi banyak industri termasuk dalam bidang pertanian.

Secara umum, bentuk utama kalsium karbonat terjadi di alam dapat dibagi menjadi dua kelompok utama: (a) Terbentuk oleh pengendapan, baik dalam bentuk amorf atau dalam bentuk kristal, seperti kalsit atau aragonit, dan (b) Bentuk yang berasal dari organik, partikel-partikel individual yang pernah membentuk bagian dari struktur organisme hidup seperti kerang laut (Al Omari *et al.*, 2016). Endapan batu kapur tersebar luas di seluruh dunia sebagai sumber utama kapur. Tidak ada angka yang dapat dipastikan yang dipublikasikan untuk penggunaan batu kapur di seluruh dunia, namun diperkirakan sekitar 4.500 juta ton per tahun (Lewicka *et al.*, 2020). Di sebagian besar negara, penggunaan utama batu kapur adalah sebagai agregat dalam konstruksi dan bangunan dan sebagai bahan baku utama untuk produksi semen, namun hal ini tak terkecuali dapat digunakan pada bidang pertanian. Di banyak negara, tingkat penggunaannya sekitar 40 hingga 50% dengan kandungan lebih dari 95%  $\text{CaCO}_3$ . Kapur sebagai bahan alkali yang paling murah dan paling banyak

digunakan dengan produksi global produk kapur diyakini lebih dari 200 juta ton per tahun (Zajac *et al.*, 2022).

### **8.1.1. Produksi Batu Kapur**

#### ***Pembentukan Batu Kapur***

Komponen kimiawi kalsium karbonat dalam bentuk ion kalsium terlarut dan karbon dioksida yang terdistribusi secara luas. Kalsium adalah unsur kelima yang paling banyak ditemukan di kerak bumi (setelah oksigen, silikon, aluminium, dan besi). Kalsium diekstraksi dari batuan beku awal melalui efek gabungan dari erosi oleh cuaca dan korosi oleh gas asam (oksida belerang, oksida nitrogen, dan karbon dioksida yang dilarutkan dalam air hujan). Karbon dioksida membentuk sekitar 0,03% volume atmosfer bumi dan terlarut dalam air tawar dan air laut. Kombinasi ion kalsium terlarut dan karbon dioksida menghasilkan endapan sedimen kalsium karbonat, yang kemudian diubah menjadi batuan kapur. Batu kapur awal diyakini telah diendapkan sebagai endapan  $\text{CaCO}_3$ , dan/atau sebagai hasil dari aktivitas biokimia organisme yang sangat sederhana (Arroyo-De Dompablo *et al.*, 2020).

Sedimentasi kalsium karbonat terjadi melalui dua mekanisme yaitu organik dan anorganik. Rute organik melibatkan berbagai macam organisme, yang membangun cangkang, kerangka atau mengeluarkan karbonat. Rute anorganik melibatkan pengendapan (atau kristalisasi) karbonat secara langsung. Sebagian besar endapan karbonat yang layak secara komersial dibentuk oleh rute organik. Organisme yang mengeluarkan karbonat (misalnya, bivalvia, gastropoda, brakiopoda, karang, spons, bryozoa, echinodermata, ostracoda, foraminifera, dan berbagai ganggang) telah ada di semua lautan di dunia (Danovaro *et al.*, 2010). Faktor yang mengendalikan laju produksi karbonat (konsentrasi kalsium, magnesium, dan karbon dioksida, suhu, salinitas, kedalaman air, dan kekeruhan) mengakibatkan sebagian besar endapan tebal dihasilkan di laut dangkal (di zona fotik). Endapan semacam itu sekarang mungkin berada di luar pita tersebut sebagai akibat dari pergeseran benua. Setidaknya ada delapan mekanisme yang dapat menyebabkan lapisan permukaan laut menjadi sangat jenuh sehubungan dengan aragonit, kalsit dan dolomit. Akan tetapi, laju pembentukan dolomit jauh lebih lambat

dibandingkan dengan kalsit dan aragonit. Akibatnya, sementara beberapa spesies organik menghasilkan struktur aragonit dan yang lainnya menghasilkan kalsit, tidak ada yang menghasilkan dolomit secara langsung. Struktur aragonit umumnya sangat rendah magnesium (biasanya kurang dari 0,5%  $\text{MgCO}_3$ ). Tergantung pada organisme dan kimiawi air (terutama rasio kalsium terhadap magnesium), struktur kalsit umumnya rendah magnesium dengan kurang dari 4%  $\text{MgCO}_3$ , atau tinggi dengan, biasanya, 11 hingga 19%  $\text{MgCO}_3$  (Fauzielly & Hamdani, 2015). Proses tersebut, ditambah dengan fakta bahwa sebagian besar organisme yang mengeluarkan karbonat hanya tumbuh subur di perairan jernih, jauh dari sungai yang membawa sejumlah besar padatan yang terbawa dari daratan, yang menjelaskan kemurnian yang sangat tinggi dari banyak endapan karbonat, yang sering melebihi 98% kalsium ditambah magnesium karbonat. Sedimen karbonat juga diproduksi dengan cara yang sama oleh organisme di perairan pedalaman, tetapi endapan yang dihasilkan umumnya tidak seluas atau sepenting endapan yang diproduksi di lingkungan laut. Pengendapan anorganik kalsium karbonat terjadi baik dari laut maupun perairan pedalaman. Rute ini telah menghasilkan beberapa endapan yang signifikan secara komersial, yang paling umum adalah batu kapur oolit dan *travertine*. Beberapa endapan dolomit kecil telah terbentuk oleh pengendapan langsung dari air laut dan danau (Fernando *et al.*, 2015).

Sebagian besar sedimen karbonat terbentuk secara *in situ*, di perairan dangkal, terakumulasi di tempat butiran-butirannya terbentuk, atau mengalami pengangkutan yang terbatas, misalnya ke bawah rataaan pasang surut yang landai. Variasi lingkungan (yang meliputi pantai, dataran pasang surut dan sub-pasang surut, laguna, terumbu karang, rataaan, lereng, dan cekungan dalam) memunculkan berbagai jenis endapan, yang karakteristiknya terkait dengan lingkungan tertentu tempat terbentuknya endapan tersebut. Diagram komposit lingkungan pengendapan karbonat utama (a) karst sub-aerial; (b) rataaan pasang surut; (c) laguna; (d) terumbu penghalang; (e) terumbu; (f) terumbu tepi rataaan; (g) lereng dengan gundukan terumbu; (h) cekungan dalam (Praptisih *et al.*, 2012).

Diagenesis adalah konversi sedimen menjadi batuan melalui proses organik, fisika dan kimia. Enam proses utama telah diidentifikasi untuk batu kapur (Jiang *et al.*, 2019) yaitu

1. Mikritisasi mikroba (*Microbial micritization*)  
Banyak organisme yang masuk ke dalam endapan karbonat. Yang paling penting adalah cyanobacteria, tetapi yang lainnya termasuk spons cliona, bivalvia, polychaetes, dan jamur. Lubang-lubang tersebut kemudian terisi oleh struktur kalsium karbonat yang disebut mikrit, yang biasanya membentuk selubung di sekitar butiran kerangka.
2. Penyemenan (*Cementation*)  
Penyemenan dihasilkan dari aliran air, yang sangat jenuh terhadap kalsit, melalui endapan batu kapur berpori, yang mengarah pada pertumbuhan kristal kalsit di dalam pori-pori, sehingga mengikat komponen-komponen endapan. Semen yang paling umum pada batu kapur berbutir sedang hingga kasar adalah sparit, atau kalsit spar (yang mengisi ruang interstisial pada batu kapur berbutir halus). Silika, dalam bentuk kristal kuarsa, juga berfungsi sebagai semen pada beberapa batu gamping.
3. Neomorfisme (*Neomorphism*)  
Neomorfisme melibatkan rekristalisasi. Karena aragonit memiliki kelarutan yang lebih tinggi dalam air daripada kalsit, aragonit secara progresif mengalami rekristalisasi dari waktu ke waktu untuk menghasilkan kalsit dengan magnesium yang sangat rendah. Kalsit mengkristal kembali menjadi kristalit yang lebih besar—dengan demikian, dalam banyak kondisi, magnesium dalam kalsit magnesium tinggi perlahan-lahan larut, meninggalkan endapan magnesium rendah (tetapi lihat dolomitisasi di bawah).
4. Pelarutan (*Dissolution*)  
Pelarutan umumnya terjadi ketika air tanah yang tidak jenuh mengalir melalui endapan. Di permukaan, hal ini menyebabkan pemandangan karst yang khas. Pada kedalaman yang lebih dalam, pelarutan ini menghasilkan gua-gua dan porositas sekunder. Porositas sekunder meningkatkan kapasitas deposit untuk bertindak sebagai reservoir minyak, air, atau gas.
5. Pemasatan (*Compaction*)  
Pemasatan terjadi selama proses penguburan dan merupakan kombinasi dari efek fisik, seperti pengemasan yang lebih dekat dan

penghancuran partikel, dan pelarutan/rekristalisasi di bawah tekanan tinggi.

6. Dolomitisasi (*Dolomitisation*)

Dolomitisasi menghasilkan pembentukan karbonat ganda  $\text{CaCO}_3$ .  $\text{MgCO}_3$ . Hal ini dapat diproduksi di dekat permukaan, segera setelah deposit terbentuk, atau dalam tahap penguburan di kemudian hari. Sebagian besar batu kapur purba, yang terbentuk pada era Prakambrium sebagian besar adalah dolomit. Dolomit biasanya mengandung hingga 90% karbonat ganda, dengan sisanya sebagian besar kalsit. Mekanisme dolomitisasi tidak dipahami dengan baik, tetapi tidak diragukan lagi melibatkan aliran air laut melalui pori-pori batu kapur dalam waktu yang lama. Magnesium terlarut mampu menggantikan ion kalsium alternatif dalam kisi kristal, karena dolomit sedikit lebih stabil daripada kalsit. Selain itu, karena kerapatan kristal dolomit sekitar 10% lebih tinggi daripada kalsit, dolomitisasi disertai dengan peningkatan porositas. Hal ini memfasilitasi dolomitisasi lebih lanjut. Hal ini juga meningkatkan kapasitas deposit untuk bertindak sebagai reservoir minyak, air, atau gas. De-dolomitisasi, dapat terjadi ketika air tanah yang rendah magnesium melewati dolomit untuk waktu yang lama. Sebagian besar proses diagenetik di atas dapat terjadi di salah satu dari tiga lingkungan. Di lingkungan laut, deposit bersentuhan dengan air laut, yang mengandung magnesium terlarut dan mungkin tidak jenuh, atau sangat jenuh sehubungan dengan spesies kalsium karbonat. Di lingkungan air tanah, deposit ini bersentuhan dengan air, yang mengandung magnesium terlarut rendah dan umumnya tidak jenuh dengan kalsium karbonat. Di lingkungan penguburan, batu ini tunduk pada tekanan tinggi dan kemungkinan suhu tinggi (atau kondisi hidrotermal) dan bersentuhan dengan air, yang mungkin memiliki komposisi yang sangat bervariasi.

Interaksi antara proses dan lingkungan dapat menjadi sangat kompleks dan memiliki pengaruh yang nyata terhadap karakteristik batu kapur. Beberapa batu kapur (misalnya kapur lunak) belum sepenuhnya dipadatkan, sangat berpori, mikro-kristal dan mengandung fosil yang jelas. Yang lainnya (misalnya *marbling*) telah bermetamorfosis sepenuhnya,

memiliki porositas yang sangat rendah, sangat kristalin dan tidak mengandung fosil yang jelas. Bidang dasar (*Bedding planes*) adalah struktur yang paling umum pada batu kapur sedimen. Struktur ini biasanya menunjukkan perubahan, atau interupsi pada kondisi sedimentasi. Lapisan lempung tipis sering diasosiasikan dengan bidang dasar. Bidang dasar horizontal yang asli dapat terganggu oleh aktivitas tektonik, menghasilkan struktur seperti antiklin, sinklin, lipatan dan patahan. Meskipun bidang dasar umumnya terbentuk sebagai permukaan pengendapan, bidang tersebut juga dapat terbentuk setelah penguburan oleh pelarutan batu kapur. Patahan yang disebabkan oleh perpindahan vertikal blok-blok batu gamping relatif terhadap satu sama lain, dapat mengganggu kesinambungan bidang lapisan hingga puluhan meter atau lebih. Struktur saat ini, seperti lapisan bukit pasir, riak dan lapisan silang, kadang ditemukan di batu kapur. Struktur-struktur tersebut dihasilkan oleh fosilisasi fitur yang dihasilkan oleh sedimen yang telah mengalami transportasi terbatas oleh arus air. Fosil permukaan karst sering ditemukan pada diskontinuitas bidang dasar, dan secara khusus terwakili dengan baik di batu kapur dengan karbon (*Carboniferous limestones*) yang menandai periode di mana permukaan sedimen berada di atas air, ketika pelarutan batu kapur oleh air permukaan menghasilkan permukaan berlubang, atau perkerasan batu kapur. Dalam keadaan seperti itu, lapisan tanah liat di atasnya mungkin merupakan bekas lapisan tanah tipis. Pelarutan batu kapur oleh air juga dapat terjadi puluhan atau ratusan meter di bawah permukaan tanah, menghasilkan struktur rongga yang bervariasi dalam ukuran dari vug (rongga kecil) hingga lubang besar (atau lubang goyang) dan gua. Rongga di dekat permukaan sering kali terisi oleh tanah liat atau beban berlebih yang terbawa turun dari permukaan (Sulastoro, 2013).

### ***Klasifikasi Batu Kapur***

Batu kapur memiliki banyak bentuk, sebagian besar endapan batu kapur berupa:

1. *Biosparites* adalah jenis batu kapur masif yang paling banyak ditemukan. Batu ini terdiri dari fragmen kerangka berkapur dan cangkang kecil dalam matriks kalsit yang direkristalisasi. Mereka adalah tipikal dari banyak batu gamping Karbon.

2. *Micrites* adalah batu gamping yang berasal dari lumpur karbonat atau lumpur.
3. *Biomicrites* adalah batu gamping yang terdiri dari kerangka atau fragmen puing-puing organik dalam matriks mikrit.
4. Batu kapur *Reef* adalah gundukan dan unit puing-puing organik, sering kali terdiri dari fosil yang lengkap. Mereka sangat fosil dan tidak memiliki struktur lapisan, karena terbentuk sebagai akumulasi tebal yang secara topografi lebih tinggi dari sekitarnya. Dalam beberapa kasus, batu gamping terumbu seperti itu dapat muncul sebagai terumbu tepi (atau apron), yang dapat memanjang hingga beberapa kilometer.
5. Batu gamping *Algal* adalah biosparit, atau biomikrit, yang dihasilkan dari aktivitas alga.
6. Batu kapur *Oolitic* terdiri dari butiran bulat kecil (dikenal sebagai ooid) berdiameter 1 mm atau kurang, yang diendapkan oleh aksi ganggang di perairan yang bergolak dan disemen dalam kalsit. Di bawah lensa tangan, mereka tampak seperti telur ikan.
7. *Dolomite* digunakan untuk mendeskripsikan mineral dan batuan. Endapan dolomit sering muncul sebagai lapisan yang berbeda di dalam batu kapur, tetapi juga dapat muncul di unit-unit lapisan yang tebal.
8. *Chalks* dari era Kapur ditemukan di barat laut Eropa dan beberapa bagian Amerika Utara. Kapur ini diendapkan di dasar laut yang relatif dalam (50 hingga 400 meter). Kapur ini berwarna putih, relatif lunak dan mengandung sangat sedikit material terigen (lumpur yang berasal dari daratan). Di bawah mikroskop, mereka terlihat sebagian besar terdiri dari lempengan ganggang (coccolith) dan foraminifera dan sering kali mengandung fosil echinodermata, bivalvia, dan brakiopoda yang besar. Marmer adalah batu kapur yang bermetamorfosis (yaitu batu kapur yang telah sepenuhnya direkristalisasi dan dikeraskan dalam kondisi hidrotermal).
9. *Marble* yang berasal dari batu kapur murni hanya terdiri dari kalsit putih. Ketika kotoran seperti dolomit, besi dan tanah liat hadir, marmer memperoleh tampilan berbintik-bintik atau berurat yang khas. (Perlu dicatat bahwa tukang batu sering menggunakan istilah

marmer untuk batu apa pun yang dapat dengan mudah dipoles, bahkan untuk beberapa granit).

10. *Travertine* terdiri dari kalsit yang diendapkan oleh pengendapan kimiawi dari mata air panas alami. Batu ini memiliki tampilan berpita yang khas dan digunakan sebagai batu bangunan dekoratif.
11. *Tufa* juga dihasilkan oleh pengendapan kimiawi dari mata air alami. Biasanya diendapkan di atas bebatuan dan lebih lembut serta lebih berpori daripada *travertine*.

Sebagian besar klasifikasi telah dikembangkan oleh dan untuk ahli geologi. Namun, ketika memilih deposit batu kapur untuk digali, pengembang akan memperhatikan sifat fisik dan kimianya serta pengaruhnya terhadap kesesuaian produk untuk penggunaan akhir yang diinginkan. Demikian pula, produsen kapur akan tertarik dengan karakteristik batu kapur yang diumpankan ke kiln, bagaimana responsnya terhadap pemanasan, dan sifat fisik dan kimia produk kapur yang dihasilkan. Banyak cara untuk mengklasifikasikan batu kapur telah dikembangkan untuk menggambarkan sifat deposit (Haldar, 2020), sebagai berikut:

1. Didasarkan pada ukuran butir rata-rata  
Berbutir mikro (atau kalsilutit):
  - kurang dari 4  $\mu\text{m}$  berbutir halus (atau kalsilutit);
  - 4 hingga 60  $\mu\text{m}$  berbutir sedang (atau kalsarenit);
  - 60 hingga 200  $\mu\text{m}$  berbutir kasar (atau kalsirudit);
  - lebih dari 200  $\mu\text{m}$  (hingga sekitar 1000  $\mu\text{m}$ )
2. Didasarkan pada struktur mikro dan mengenali tiga komponen, yaitu: aloksi (butiran), matriks (terutama mikro) dan semen (terutama sparit)
3. Berdasarkan tekstur
  - *Mudstone* (kalsit) untuk lumpur kalsit yang disemen (atau mikrit) dengan sedikit butiran kasar, wakestone di mana lebih dari 10% butiran kasar terdistribusi dalam semen lumpur kalsit,
  - *Packstone* yang sebagian besar merupakan butiran kasar yang bersentuhan dekat dengan semen lumpur kalsit,
  - *Grainstone*, yang sebagian besar merupakan butiran tanpa semen lumpur,

- *Boundstone*, di mana komponen-komponen tersebut diikat menjadi satu selama pengendapan (mis. di sebuah terumbu) dan menggunakan istilah-istilah seperti: *compact - crystalline - earthy - saccharoidal - cherty - pisolitic - conglomeratic - unconsolidated*.
4. Didasarkan pada pengotor utama:
    - *carbonaceous* (dengan karbon)
    - *arenaceous* (atau berpasir)
    - *ferruginous* (dengan besi)
    - *argillaceous* (atau lempung)
    - *siliceous* (dengan silika)
    - *phosphatic* (dengan fosfor)
  5. Didasarkan pada kandungan karbonat.
    - Kalsium sangat tinggi (lebih dari 97%  $\text{CaCO}_3$ )
    - Kalsium tinggi, atau kelas kimia (lebih dari 95%  $\text{CaCO}_3$ )
    - Karbonat dengan kemurnian tinggi (lebih dari 95%  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ )
    - Kalsit (kurang dari 5%  $\text{MgCO}_3$ )
    - Magnesit (5 hingga 20%  $\text{MgCO}_3$ )
    - Dolomit (20 hingga 40%  $\text{MgCO}_3$ )
    - Dolomit magnesium tinggi (40 hingga 46%  $\text{MgCO}_3$ )

Endapan batu kapur meliputi sekitar 10% dari permukaan bumi dan ditemukan di sebagian besar negara. Tiga faktor utama yang saling terkait memiliki pengaruh besar terhadap pembentukan batu kapur di seluruh dunia (Skipper *et al.*, 2022), yaitu:

- Iklim, secara langsung memengaruhi laju pengendapan karbonat, baik melalui jalur organik maupun anorganik. Seperti yang telah disebutkan, sebagian besar batu gamping diendapkan di laut dangkal. Curah hujan yang rendah mendukung produksi karst dengan mengurangi jumlah material terestrial yang tersapu dari daratan, menurunkan tingkat kekeruhan dan meningkatkan kedalaman zona fotik, sehingga meningkatkan area di mana endapan karbonat diproduksi. Sebaliknya, kekeruhan dan pengendapan menghambat pertumbuhan sebagian besar organisme penghasil karbonat.

- Geoteknik, secara langsung memengaruhi terjadinya batu kapur dalam tiga cara—pergeseran benua, penurunan regional, dan pengangkatan regional. Karena benua-benua purba yang asli terbentuk di lintang selatan yang relatif tinggi, bagian-bagian lempeng benua yang tetap umumnya memiliki sedikit batu kapur. Sebaliknya, benua-benua yang melayang ke dalam dan, dalam beberapa kasus, relatif kaya akan endapan batu kapur. Sebagai contoh, endapan batu kapur Karbon yang sangat besar di Inggris terbentuk di daerah khatulistiwa dan sub-tropis, sedangkan batu kapur Jura yang lebih baru dan endapan kapur. Kapur terbentuk di zona beriklim hangat di lintang yang semakin tinggi. Batu gamping lebih jarang ditemukan pada inti benua tua (atau perisai), meskipun, di tempat-tempat di mana laut dangkal terbentuk, beberapa karbonat diendapkan pada batuan purba dan kemudian diubah menjadi batu gamping. Penurunan permukaan tanah regional, ditambah dengan naiknya permukaan air laut, memiliki dua efek pada pengendapan karbon. Hal ini mengakibatkan terbentuknya laut dangkal, yang dengan kombinasi suhu, salinitas, dan kekeruhan yang rendah, sangat mendukung produksi karbonat. Ketika terjadi penurunan dasar laut secara progresif dalam waktu yang lama, endapan sedimen sedalam ratusan meter dapat terakumulasi (misalnya, ketebalan endapan Trias di Dolomit barat lebih dari 2.000 meter). Sebaliknya, pengangkatan regional, ditambah dengan penurunan permukaan laut, mengangkat endapan di atas permukaan laut ke posisi di mana mereka sekarang ditemukan. Efek tidak langsung dari geoteknik adalah mengubah volume pegunungan tengah samudra, yang pada gilirannya memengaruhi permukaan laut.
- Permukaan laut, telah bervariasi sebagai akibat dari efek yang disebutkan di atas dan memiliki efek yang nyata pada area laut dangkal di seluruh dunia. Secara historis, permukaan laut pada umumnya lebih tinggi daripada saat ini (mungkin lebih dari 100 m lebih tinggi pada periode Kapur) dan area laut dangkal yang mampu menopang organisme penghasil karbon jauh lebih besar daripada saat ini.

Sebagai hasil dari faktor-faktor di atas, setiap deposit batu kapur memiliki sejarah yang unik dalam hal organisme/mekanisme penghasil karbonat, lingkungan sedimen, mekanisme diagenetik, dan geoteknik yang terlibat.

### 8.1.2. Karakteristik Fisiko-Kimia Batu Kapur

Sifat fisik dan kimiawi batu kapur sangat bervariasi, tergantung pada rute pembentukannya, lingkungan sedimen, dan perubahan yang disebabkan oleh diagenesis. Secara umum, nomor registrasi Chemical Abstracts Service (CAS) untuk batu kapur,  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{MgCO}_3$  masing-masing adalah 1317-65-3, 471-34-1 dan 546-93-0, sedangkan dari EINECS (European Inventory of Existing Commercial Substances) untuk batu kapur adalah 207-439-9 (Alfayed *et al.*, 2020).

#### *Sifat Fisik Batu Kapur*

Sifat Fisik	Ket.
Berat Molekul ( <i>Molecular weight</i> )	: Berat molekul untuk $\text{CaCO}_3$ dan $\text{MgCO}_3$ masing-masing adalah 100,09 dan 84,32.
Warna ( <i>Colour</i> )	: Warna batu kapur sering kali mencerminkan tingkat dan sifat pengotor yang ada. Endapan putih umumnya memiliki kemurnian tinggi. Berbagai corak warna abu-abu dan gelap biasanya disebabkan oleh bahan berkarbon dan/atau besi sulfida. Warna kuning, krem, dan merah menunjukkan adanya kandungan besi dan mangan. Kotoran pada marmer sering kali menghasilkan berbagai warna dan pola.
Aroma ( <i>Odour</i> )	: Batu kapur sering kali memiliki aroma apek atau aroma tanah, yang disebabkan olehnya kandungan zat karbonnya.
Tekstur ( <i>Texture</i> )	: Tekstur batu kapur sangat bervariasi. Semua batu kapur berbentuk kristal, dengan ukuran butiran rata-rata mulai dari kurang dari 4 $\mu\text{m}$ hingga sekitar 1000 $\mu\text{m}$ . Distribusi ukuran butir memengaruhi tekstur, dan berkisar dari <i>mudstone</i> (terutama <i>mud</i> -kalsit dengan sedikit butiran kasar) hingga <i>grainstone</i> (terutama butiran kasar dengan sedikit <i>mud cement</i> ).
Struktur Kristal ( <i>Crystal structure</i> )	: Kalsit dan dolomit memiliki struktur rhombohedral, sedangkan aragonit berbentuk belah ketupat
Berat jenis ( <i>Specific</i> )	: Gravitasi spesifik dari bentuk kristal kalsium karbonat

Sifat Fisik	Ket.
<i>gravity</i> )	dan dolomit pada suhu 20 <sup>0</sup> C adalah: kalsit 2,72 g/cm <sup>3</sup> , aragonit 2,94 g/cm <sup>3</sup> dan dolomit 2,86g/cm <sup>3</sup>
Porositas ( <i>Porosity</i> ) :	Porositas batu kapur sangat bervariasi tergantung pada tingkat pemadatan dan strukturnya. Nilai tipikal (berdasarkan volume) adalah 0,1 hingga 2% untuk marmer, 0,1 hingga 30% untuk batu kapur, 15 hingga 40% untuk <i>chalks</i> , dan hingga 50% untuk <i>marls</i> . Porositas dolomit umumnya berada dalam kisaran 1 hingga 10%.
Penyerapan air ( <i>Water absorption</i> ) :	Penyerapan air tergantung pada porositas, distribusi ukuran pori dan tingkat kandungan karbon. Dengan demikian, batu kapur yang padat dapat mengandung 0,4% air menurut beratnya, sedangkan <i>chalks</i> dapat mengandung 20% air.
Kepadatan yang tampak ( <i>Apparent density</i> ) :	Kepadatan kristal dan jumlah air di dalam pori-pori. Untuk batu kapur yang dikeringkan pada suhu 110 <sup>0</sup> C, nilai tipikal adalah 1,5 hingga 2,3 g/cm <sup>3</sup> untuk <i>chalks</i> , hingga 2,7 g/cm <sup>3</sup> untuk batu kapur berkalsium tinggi yang padat, dan 2,7 hingga 2,9 g/cm <sup>3</sup> untuk dolomit.
Kepadatan massal ( <i>Bulk density</i> ) :	Berat jenis sangat bergantung pada berat jenis semu batu kapur, distribusi ukuran partikel, dan bentuk partikel. Batu kapur yang dihancurkan dan disaring dengan densitas semu 2,7 g/cm <sup>3</sup> dan rasio ukuran atas dan bawah 2:1 biasanya memiliki densitas curah 1400 hingga 1450kg/m <sup>3</sup> . Bentuk partikel yang lempengan cenderung meningkatkan densitas, sementara bentuk kubus mengurangnya. Kandungan butiran yang tinggi dapat meningkatkan densitas hingga 25%. Keberadaan air di dalam pori-pori dapat secara signifikan meningkatkan kepadatan batu kapur berpori. Air permukaan di antara partikel dapat mendorong pengemasan produk yang mengandung kandungan halus yang tinggi, sehingga meningkatkan kepadatan.
Sudut istirahat ( <i>Angle of repose</i> ) :	Sudut eksternal istirahat untuk batu kapur yang disaring umumnya berkisar antara 35 hingga 45 <sup>0</sup> , tetapi dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti distribusi ukuran, kebersihan, dan kadar air. Sudut ini dapat mendekati 90 <sup>0</sup> untuk produk lembap yang mengandung tingkat denda yang signifikan. Bahan-bahan seperti itu rentan terhadap pemadatan dan "lubang tikus" di dalam bunker. Sudut internal reposisi dapat berbeda secara signifikan dari sudut eksternal yang biasa diukur dan hal ini dapat memengaruhi

Sifat Fisik	Ket.
Kekuatan ( <i>Strength</i> )	kapasitas hidup bunker dan <i>stockpile</i> . Kekuatan tekan batu kapur bervariasi dari 10MN/m <sup>2</sup> untuk beberapa <i>marls</i> dan <i>chalks</i> hingga 200MN/m <sup>2</sup> untuk beberapa <i>marbles</i> . Kekuatan tekan yang umum untuk batu kapur berkalsium tinggi yang padat adalah 180 MN/m <sup>2</sup> .
Kekerasan ( <i>Hardness</i> )	: Kekerasan batu kapur pada umumnya terletak pada kisaran 2 hingga 4 Mohs.
Ketahanan abrasi ( <i>Abrasion resistance</i> )	: Ketahanan agregat terhadap abrasi diukur dari nilai abrasi agregat dan nilai batu yang dipoles. Ukuran alternatif adalah Indeks Kerja Ikatan, yang berkisar antara 4 untuk batu kapur lunak, hingga sekitar 10 kW.jam/t untuk batu kapur padat yang khas.
Panas spesifik ( <i>Specific heat</i> )	: Panas spesifik kalsit pada suhu 0 (0.191); 200 (0.239); 400 (0.270); 600 (0.296) dan 800 °C (0.322 kal/g.°C). Dolomit sebesar 0,22 kal/g.°C telah dilaporkan untuk kisaran suhu sekitar 20 hingga 100 °C.
Koefisien muai panas ( <i>Coefficient of thermal expansion</i> )	: Koefisien muai panas untuk batu kapur berkisar antara 4 hingga 9*10 <sup>-6</sup> /°C, sedangkan nilai untuk marmer adalah 3 hingga 15*10 <sup>-6</sup> /°C.
Konduktivitas termal ( <i>Thermal conductivity</i> )	: Konduktivitas termal tergantung pada porositas dan strukturnya. Kisaran yang dikutip untuk <i>marbles</i> pada suhu 30 °C adalah 0,0050 hingga 0,0077 cal.cm/cm <sup>2</sup> .detik.°C. Nilai untuk batu kapur berkalsium tinggi, batu kapur dolomit, dan kapur (pada suhu 130 °C) adalah 0,0039, 0,0034, dan 0,0022 cal.cm/cm <sup>2</sup> .detik.°C. Konduktivitas menurun dengan meningkatnya suhu (misalnya, dari 0,00614 kal/cm <sup>3</sup> .detik.°C pada 50 hingga 100 °C, menjadi 0,00415 kal. cm/cm <sup>2</sup> .detik.°C pada suhu 150 hingga 200 °C.
Kecepatan suara ( <i>Velocity of sound</i> )	: Kecepatan suara sebesar 3810 m/detik untuk marmer
Kecerahan ( <i>Brightness</i> )	: Kecerahan adalah parameter penting untuk kapur sirih ( <i>whiting</i> , CaO) dan kalsium karbonat yang diendapkan, ketika digunakan sebagai pengisi dan pigmen dalam cat dan pelapis kertas. Kapur sirih umumnya memiliki nilai kecerahan dalam kisaran 75 hingga 95, sedangkan nilai tipikal untuk PCC adalah lebih dari 95.

## Sifat Kimia Batu Kapur

Sifat Kimia	Ket.
Stabilitas ( <i>Stability</i> )	: Aragonit bersifat stabil sehubungan dengan kalsit di bawah kondisi <i>ambient</i> , dan akibatnya memiliki kelarutan yang lebih tinggi dalam air. Dengan adanya air, aragonit perlahan-lahan mengkristal kembali menjadi kalsit. Ini juga mengkristal kembali menjadi kalsit pada suhu 400 hingga 500 °C tanpa adanya air. Kalsit bersifat metastabil sehubungan dengan dolomit dengan adanya air laut (yang mengandung magnesium terlarut). Proses dolomitisasi berlangsung lambat, bahkan dalam istilah geologi. Namun, proses ini perlahan-lahan berbalik dengan adanya air tawar.
<p>Dekomposisi termal kalsium dan magnesium karbonat dijelaskan di bawah ini:</p>	
Kelarutan dalam air bebas karbon dioksida	: Kelarutan kalsit dalam air suling yang bebas dari karbon dioksida adalah 14 mg/l pada suhu 25 °C, meningkat menjadi 18 mg/l pada suhu 75 °C. Kelarutan aragonit meningkat dari 15,3 mg/l pada suhu 25 °C menjadi 19,0 mg/l pada suhu 75 °C. Namun demikian, nilai-nilai ini hanya untuk kepentingan akademis, karena air alami mengandung karbon dioksida yang tidak terlarut.
Reaksi dengan CO <sub>2</sub>	: Peningkatan "kelarutan" batu kapur dengan adanya karbon dioksid. Hasil ini yang membentuk kalsium dan magnesium bikarbonat. Sebagai contoh, pada suhu 20 °C, sekitar 30 mg/l kalsit akan larut dalam air suling pada kesetimbangan dengan karbon dioksida di atmosfer. Pada pemanasan larutan kalsium dan magnesium bikarbonat, karbon dioksida dievolusi dan kalsium dan magnesium karbonat mengendap (mekanisme ini bertanggung jawab atas pembentukan kerak di ceret dan ketel di daerah air sadah).
pH H <sub>2</sub> O	: Batu kapur kalsit memberikan nilai pH antara 8,0 dan 9,0. Sedangkan, dolomit memberikan nilai 9,0 hingga 9,2.
Reaksi dengan <i>aqueous acids</i>	: Secara umum, batu kapur mudah bereaksi dengan asam dan digunakan untuk netralisasi asam. Batu kapur berkalsium tinggi mudah bereaksi dengan asam klorida dan asam nitrat encer pada suhu sekitar, sedangkan batu kapur dolomit dan dolomit hanya bereaksi dengan mudah jika asam encer tersebut dipanaskan. Reaksi batu kapur

---

	dengan asam belerang (yang dibentuk oleh pelarutan sulfur dioksida dalam air) adalah dasar dari proses desulfurisasi. Reaksi dengan asam yang membentuk garam kalsium yang tidak larut atau sedikit larut (misalnya, asam belerang, sulfat, oksalat, hidrofluorat, dan fosfat) dihambat oleh produk reaksi.
Reaksi pemanasan dengan asam.	: Panas reaksi kalsit dengan asam klorida telah dilaporkan sebesar 4495 cal/mol, atau 18,8 kJ/mol.
Reaksi dengan <i>acidic gases</i>	: Batu kapur mudah bereaksi dengan gas hidrogen klorida dan hidrogen fluorida, membentuk kalsium klorida dan fluorida secara berurutan. Sulfur dioksida kering bereaksi dengan batu kapur pada suhu 95 °C ke atas untuk menghasilkan kalsium sulfit. Sulfur trioksida juga bereaksi dengan batu kapur untuk menghasilkan sulfat.
Dekomposisi termal ( <i>Thermal decomposition</i> )	: Kalsium karbonat terurai menjadi kalsium oksida dan karbon dioksida apabila dipanaskan. Panas disosiasi CaCO <sub>3</sub> adalah 1781 kJ/kg relatif terhadap 25 °C, dan 1686 kJ/kg relatif terhadap 900 °C (masing-masing 426 kkal/kg dan 403 kkal/kg). Nilai yang sesuai untuk magnesium karbonat adalah 1439 kJ/kg MgCO <sub>3</sub> relatif terhadap 25 °C dan 1362 kJ/kg relatif terhadap 700 °C. Tekanan disosiasi karbon dioksida untuk kalsit pada suhu 600 (0.003); 700 (0.026); 750 (0.079); 800 (0.24); 850 (0.50) dan 900 °C [1 CO <sub>2</sub> pressure (atmospheres)]. Pada suhu sekitar 900 °C, tekanan mencapai 1 atmosfer, ini secara umum disebut sebagai suhu dekomposisi kalsium karbonat.

---

### ***Pengotor dalam Batu Kapur***

Tingkat pengotor dan elemen jejak memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap kesesuaian batu kapur untuk berbagai aplikasi, pengaruh faktor geologi. Pengotor dapat masuk pada setiap tahap pengendapan dan diagenesis *subsequent*. Namun, sehubungan dengan pembuatan produk batu kapur, ada baiknya untuk mengenali tiga proses utama:

1. Masuknya materi non-karbonat ke dalam endapan pada saat pengendapan. Contohnya termasuk materi karbon dari organisme yang membusuk, dan partikel-partikel tanah liat, lumpur dan pasir.
2. Pengendapan jangka pendek dari endapan terigenous, yang cukup substansial untuk mengganggu produksi karbonat, dan yang dimanifestasikan sebagai lapisan kreta di dalam batu kapur.

3. Perpindahan material tersuspensi yang terbawa air (terutama lempung dan lanau) dan unsur-unsur terlarut (seperti magnesium, silikon, *fluor*, timbal, besi dan logam berat lainnya) ke dalam sesar. Unsur-unsur terlarut mungkin telah bermigrasi dari patahan ke dalam endapan melalui retakan dan pori-pori di batu kapur.

Tabel 8.1 Kisaran elemen pengotor dalam batu kapur komersial (Sandström *et al.*, 2021)

Pengotor	Nilai Kisaran	Unit
Silica (SiO <sub>2</sub> )	0.1-2	%
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.04-1.5	%
Iron (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.02-0.6	%
Sulfur (CaSO <sub>4</sub> )	0.01-0.5	%
Carbonaceous matter	0.01-0.5	%
Manganese (MnO <sub>2</sub> )	20-1000	mg/kg
Antimony (Sb)	0.1-3	mg/kg
Arsenic (As)	0.1-15	mg/kg
Boron (B)	1-20	mg/kg
Cadmium (Cd)	0.1-1.5	mg/kg
Chromium (Cr)	3-15	mg/kg
Copper (Cu)	1-30	mg/kg
Fluoride (F)	5-3000	mg/kg
Lead (Pb)	0.5-30	mg/kg
Mercury (Hg)	0.02-0.1	mg/kg
Molybdenum (Mo)	0.1-4	mg/kg
Nickel (Ni)	0.5-15	mg/kg
Selenium (Se)	0.02-3	mg/kg
Silver (Ag)	0.2-4	mg/kg
Tin (Sn)	0.1-15	mg/kg
Vanadium (V)	1-20	mg/kg
Zinc (Zn)	3-500	mg/kg

Pengotor yang dimasukkan melalui proses (a) secara efektif bersifat homogen dan tidak dapat dihindari dengan penggalian selektif, atau dihilangkan dengan pencucian yang diperkenalkan oleh proses (b) bersifat heterogen dan umumnya dikurangi dengan pencucian dan/atau penyaringan. Tergantung pada sifat deposit, dimungkinkan untuk menguranginya lebih lanjut dengan penggalian selektif. Banyak pengotor yang ditimbulkan oleh (c) terkonsentrasi di daerah yang mengalami

patahan dan sebagian besar dapat dihindari dengan penggalian selektif (Sandström *et al.*, 2021).

Kadar magnesium karbonat dalam endapan kalsit umumnya kurang dari 4% atau antara 11 hingga 19%. Kadar tersebut dapat dinaikkan dengan dolomitisasi, yang dilakukan melalui proses. Untuk sebagian besar penggunaan batu kapur, magnesium tidak dianggap sebagai pengotor yang tidak diinginkan. Namun demikian, ada beberapa aplikasi yang membutuhkan kurang dari 4%  $MgCO_3$  (misalnya, produksi semen). Proses lain hanya dapat menggunakan kapur terhidrasi yang mengandung lebih dari 5%  $MgCO_3$ , jika komponen magnesium sepenuhnya diubah menjadi  $Mg(OH)_2$  dengan hidrasi bertekanan (misalnya, produksi plester). Migrasi zat terlarut dari patahan ke dalam tubuh batu kapur dapat mengakibatkan mineralisasi batuan di sekitar patahan. Untuk produksi batu kapur rutin, batuan tersebut umumnya di-tip (*tipped*). Namun, endapan bijih logam yang penting secara komersial ditemukan pada beberapa jenis batu kapur. Deposit tersebut meliputi galena ( $PbS$ ), sfalerit ( $ZnS$ ), barit ( $BaCO_3$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ) dan fluorit ( $CaF_2$ ).

Beberapa endapan mengandung konsentrasi logam yang layak secara komersial, yang paling penting adalah perak dan merkuri. Silika dan alumina, dalam bentuk lempung, lanau dan pasir umumnya ditemukan sebagai pengotor heterogen dalam fitur-fitur seperti sesar dan bidang-bidang lapisan, dan juga terjadi sebagai pengotor homogen. Ketika batu gamping yang mengandung 5 hingga 10% materi lempung dikalsinasi, batu gamping tersebut menghasilkan batu gamping hidrolik yang lemah: batu gamping yang mengandung 15% hingga 30% menghasilkan batu gamping yang sangat hidrolik. *Chert* (suatu bentuk silika) terbentuk sebagai hasil silifikasi. Dalam proses ini,  $SiO_2$  yang terlarut, yang mungkin berasal dari organik atau anorganik, bermigrasi ke dan/atau di dalam batu gamping, baik sebagai mineral pengganti, maupun sebagai deposit primer. Rijang sering terkonsentrasi pada horizon tertentu, membentuk lapisan-lapisan. Flint adalah salah satu jenis rijang, yang hanya ditemukan pada batu kapur. Besi ditemukan secara homogen sebagai besi karbonat dan secara heterogen sebagai pirit ( $FeS_2$ ) dan limonit [ $FeO(OH)$ ]. Belerang dari sulfat, dan karbon dari residu organik terutama ditemukan sebagai pengotor homogen. Tingkat pengotor dan elemen jejak

yang umum ditemukan dirangkum dalam Tabel 8.1. Tabel ini didasarkan pada informasi yang dilihat oleh penulis dan pada analisis spektro-grafik yang dipublikasikan dari 25 batu kapur di Amerika yang berkalsium tinggi.

### 8.1.3. Aplikasi Kapur dalam Bidang Pertanian

Pengapuran adalah teknologi pemberian kapur ke dalam tanah, yang bertujuan untuk memperbaiki kesuburan tanah. Umumnya bahan kapur untuk bidang pertanian yang sering digunakan adalah kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), beberapa dalam kalsium magnesium karbonat [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ], dan hanya sedikit yang berupa  $\text{CaO}$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Kapur tohor sebagai salah satu jenis kapur yang merupakan material berwarna putih berbentuk amorfos dengan rumus kimia  $\text{CaO}$  dan mempunyai titik cair  $257^\circ\text{C}$  serta titik didih  $2850^\circ\text{C}$ . Batu kapur tohor berbentuk bongkahan berwarna putih, dan mempunyai umur simpan yang relatif pendek yaitu sekitar 60 hari. Selama penyimpanan,  $\text{CaO}$  akan berubah sedikit demi sedikit menjadi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  yang berbentuk bubuk putih karena bereaksi dengan uap air yang ada di udara. Batu kapur tohor ( $\text{CaO}$ ) terbentuk jika batu kapur ( $\text{CaCO}_3$ ) dipanaskan pada suhu di atas  $650^\circ\text{C}$ . Batu kapur ( $\text{CaCO}_3$ ) adalah batuan sedimen yang dapat dibentuk oleh rombakan batu kapur yang lebih tua, endapan larutan  $\text{CaCO}_3$ . Reaksi pembentukan  $\text{CaO}$  merupakan reaksi endoterm dan bersifat reversibel. Jika  $\text{CO}_2$  yang terbentuk disingkirkan, maka  $\text{CaO}$  yang terbentuk akan semakin banyak.

Berarti secara teoretis, dari 100 kg  $\text{CaCO}_3$  akan dihasilkan 44 kg  $\text{CO}_2$  yang akan dilepaskan ke udara dalam bentuk gas dan 56 kg  $\text{CaO}$ . Bentuk  $\text{CaCO}_3$  setelah dibakar menjadi  $\text{CaO}$ , sama dengan bentuk sebelumnya sehingga porositasnya meningkat, karena setelah dibakar berarti  $\text{CO}_2$  telah dilepaskan dan beratnya akan menurun menjadi 56%-nya. Secara komersial  $\text{CaO}$  diproduksi dengan memanaskan batu kapur pada suhu antara  $800^\circ\text{C}$ - $1200^\circ\text{C}$ . Dapur pembakaran yang digunakan dapat bermacam-macam tipe seperti: *rotary kiln*, *slightly inclined, revolving steel cylinder* dan *vertical shaft kiln*. Tiga kelas kapur tohor berdasarkan derajat panas yang diberikan pada waktu pembentukannya yaitu:

1. *Soft burnt lime*, dihasilkan dari pembakaran pada kisaran suhu yang paling rendah. Produk yang dihasilkan sangat reaktif.

2. *Hard burnt lime*, dihasilkan dengan pembakaran pada kisaran suhu yang tinggi dan waktu yang lebih lama sehingga terbentuk kristal dan produk yang dihasilkan mempunyai reaktivitas yang rendah.
3. *Medium burnt lime*, yaitu produk yang dihasilkan dari proses dengan waktu dan suhu di antara kedua proses di atas.

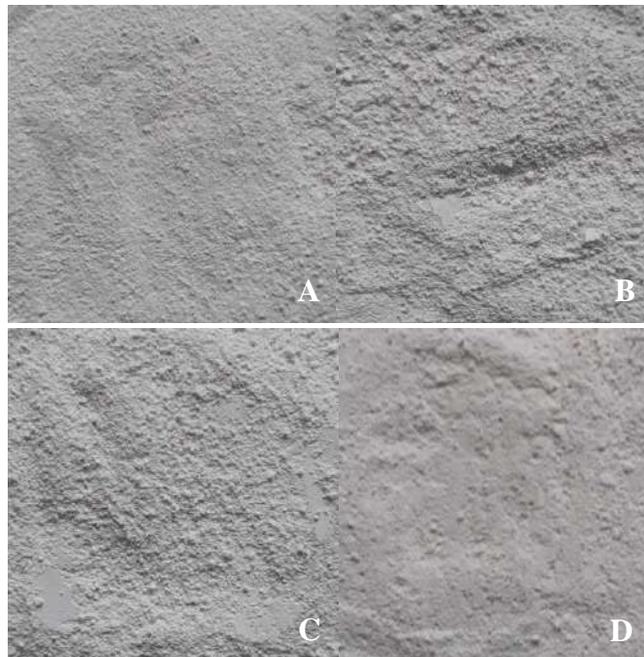
Tabel 8.2 Beberapa sifat fisik dari batu kapur tohor (CaO) pada tingkat pembakaran yang berbeda

Sifat Fisik	Unit	<i>Soft burnt lime</i>	<i>Medium burnt lime</i>	<i>Hard burnt lime</i>
<i>Spesific weight</i>	g/cm <sup>3</sup>	3,35	3,35	3,35
<i>Bulk weight</i>	g/cm <sup>3</sup>	1,5-1,8	1,8-2,2	>2,2
Total porositas	%	46-55	34-46	<34
Permukaan spesifik	m <sup>2</sup> /g	> 1,0	0,3-1,0	<0,03
Waktu untuk mencapai 80% dari <i>Slacking Time</i>	Menit	<1,0	10-20	>20

Batu kapur tohor atau CaO merupakan bahan yang bersifat reaktif dengan air dan akan membentuk Ca(OH)<sub>2</sub> yang berbentuk bubuk. Reaksi CaO dengan air membentuk Ca(OH)<sub>2</sub> merupakan reaksi eksoterm yang akan melepaskan kalor dan menghasilkan bahan yang berbentuk putih. Secara teoretis, air yang diserap dalam pembentukan Ca(OH)<sub>2</sub> adalah sebesar  $18.02/56.08 = 1/3$  kali berat CaO. Reaksi yang bersifat eksoterm menyebabkan penyimpanan kapur tohor penuh resiko karena suhu dapat mencapai 700 °C pada reaksi antara CaO dengan air. Ca(OH)<sub>2</sub> (*slaked/hydratedlime*) dapat disimpan untuk waktu yang lebih lama dari CaO. Waktu penyimpanan Ca(OH)<sub>2</sub> lebih kurang tiga bulan, walaupun akan terdekomposisi juga karena bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dan menghasilkan Ca(OH)<sub>2</sub> yang merupakan bahan awal CaO.

Dua bahan utama kapur di masyarakat dalam bidang pertanian yang lebih dikenal ialah kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>), dan dolomit [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]. Bahan kapur yang biasanya diperdagangkan dalam bentuk tepung (bubuk). Makin halus bahan tersebut makin cepat daya larut dan reaksinya. Dolomit sebenarnya tergolong mineral primer yang mengandung unsur Ca dan Mg sebagai bahan pengapur pada tanah-tanah masam untuk menaikkan pH

tanah. Mineral utama penyusun kapur adalah kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) dan dolomit [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] yang tergolong dalam mineral sekunder. Kapur juga bisa dalam bentuk  $\text{CaCO}_3$  atau  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , atau dalam bentuk oksida seperti  $\text{CaO}$  atau  $\text{MgO}$ . Dolomit berwarna putih keabu-abuan atau kebiru-biruan dengan kekerasan lebih lunak dari batu kapur, yaitu berkisar antara 3,50-4,00, bersifat pejal, berat jenis antara 2,80-2,90, berbutir halus hingga kasar dan mempunyai sifat mudah menyerap air serta mudah dihancurkan. Klasifikasi dolomit dalam perdagangan mineral industri didasarkan atas kandungan unsur magnesium (Mg), kandungan mineral dolomit dan unsur kalsium (Ca). Kalsit dan Dolomit banyak digunakan karena relatif murah dan mudah didapat di pasaran sedangkan kapur tohor dan kapur hidrat biasanya digunakan dalam bidang industri.



Gambar 8.1 Visualisasi dari beberapa jenis kapur:  $\text{CaO}$  (A);  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (B);  $\text{CaCO}_3$  (C) dan  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (D)

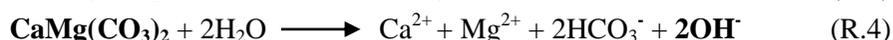
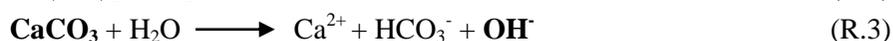
Berdasarkan hasil identifikasi Maulana, (2020) menggunakan empat jenis kapur yaitu  $\text{CaO}$  (kapur tohor/aktif/bakar),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (kapur

hidrat/padam),  $\text{CaCO}_3$  (batu kapur/kalsit) dan  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (dolomit), di mana morfologi kapur terlihat pada masing-masing Gambar 8.1.1.A, B, C dan D. Warna yang dimiliki dari masing-masing kapur terlihat hampir sama, di mana diidentifikasi menggunakan buku Soil Munsell Color Chart yaitu Hue N 7/0 (grayish white) untuk  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  dan Hue N 8/0 (grayish white) untuk  $\text{CaO}$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Perbedaan warna kapur hanya dibedakan dari nilai *value* (tingkat kecerahan dari warna) yang dimiliki pada masing-masing kapur, di mana warna  $\text{CaO}$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  memiliki tingkat kecerahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Hal ini disebabkan dari proses pembentukan kapur dan diduga pengaruh dari kandungan  $\text{CO}_2$  yang dimiliki pada masing-masing kapur. Warna kapur yaitu *light grey–dark grey*. Perubahan warna pada  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  dihasilkan oleh berbagai kondisi lingkungan seperti pelapukan alami, pertumbuhan organisme, penuaan lapisan dan sebagainya. Proses perubahan batu kapur menjadi  $\text{CaO}$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  yang melibatkan proses perpindahan massa dan panas antara partikel  $\text{CaCO}_3$  padat dan gas selama proses kalsinasi. Reaksi kalsinasi bersifat reversibel dan endotermik (panas 4,6 MJ diperlukan/kg  $\text{CaO}$  yang dihasilkan pada suhu 520-580 °C) dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  terbentuk dari proses hidrolisis atau gabungan air dengan  $\text{CaO}$ . Dolomit terbentuk dari batuan karbonat yang terdiri dari karbonat ganda [ $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{MgCO}_3$ ] dan diasosiasikan dengan garam dan lapisan gipsum yang salinitasnya tinggi dan pengendapan kalsium karbonat dan sulfat serta penggantian kalsium dalam batu kapur oleh magnesium menghasilkan rekristalisasi batu kapur untuk membentuk  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (*Dolomitization*). Proses penggantian ini, cenderung menghancurkan tekstur dan struktur batuan aslinya, di mana rekristalisasi menghasilkan batuan kristal dolomit yang diuraikan dengan baik dalam bentuk butiran halus dan berbintik-bintik (Kępniak *et al.*, 2017).

Tabel 8.3 Karakteristik kimia dari berbagai jenis kapur (Maulana, 2020)

Sifat Kimia	Satuan	Jenis Kapur			
		$\text{CaO}$	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Ca}(\text{CO}_3)_3$	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
pH $\text{H}_2\text{O}$ (1:1)	Unit	13,19	13,25	10,25	11,20
KTK	$\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$	1,54	1,83	6,52	7,55
Kadar Ca	%	61,00	54,00	48,00	53,00
Kadar Mg	%	-	-	-	29,00

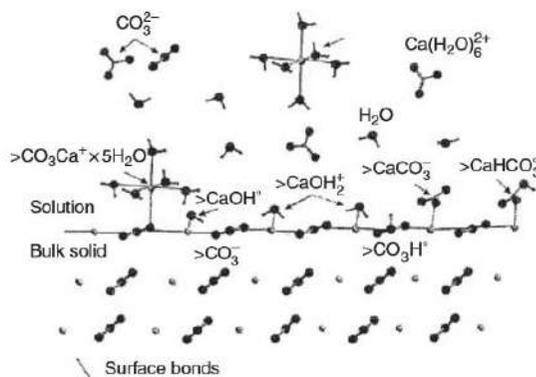
Nilai pH H<sub>2</sub>O tertinggi pada Ca(OH)<sub>2</sub> sebesar 13,25 unit, selanjutnya diikuti CaO dengan 13,19 unit; CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 11,20 unit; dan Ca(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> sebesar 10,25 unit. Hal ini disebabkan dari jumlah ion OH<sup>-</sup> yang terbentuk dari berbagai jenis kapur tersebut. pH yang dimiliki dari berbagai jenis kapur sekitar 10-13 unit. Reaksi hidrolisis pada kapur akan menghasilkan perubahan pada permukaan kapur, di mana ion H<sup>+</sup> dan OH<sup>-</sup> sebagai penciri ion potensial (Gambar 8.2). Ketika kapur terhidrolisis, muatan permukaan dapat dihasilkan oleh masing-masing ion seperti Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup> dan CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Kapur terlihat kompleks dalam media berair karena kelarutannya yang diatur oleh perubahan ion pada permukaan dan keseimbangan kimia. Secara umum ada tiga faktor yang memengaruhi elektrokinetik dari partikel kapur yaitu: (1) Kekuatan ionik; (2) pH dan (3) Konsentrasi *surfactant* (Alotaibi *et al.*, 2011). Jumlah ion OH<sup>-</sup> yang disumbangkan oleh Ca(OH)<sub>2</sub> lebih banyak dibandingkan dengan jenis kapur yang lainnya (reaksi 1, 2, 3 dan 4).



Kapasitas tukar kation yang dimiliki dari berbagai kapur, di mana KTK tertinggi terdapat pada CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> sebesar 7,55 cmol<sub>(+)</sub>.kg<sup>-1</sup>; jika dibandingkan dengan Ca(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> sebesar 6,25 cmol<sub>(+)</sub>.kg<sup>-1</sup>; Ca(OH)<sub>2</sub> sebesar 1,83 cmol<sub>(+)</sub>.kg<sup>-1</sup>; dan CaO sebesar 1,54 cmol<sub>(+)</sub>.kg<sup>-1</sup>. Hal ini disebabkan jumlah muatan negatif yang dimiliki dari masing-masing kapur dan diduga akibat pengaruh dari proses pembentukan serta kandungan CO<sub>2</sub> yang dimiliki dari masing-masing kapur. KTK dari berbagai jenis kapur yaitu sekitar 0-8 cmol<sub>(+)</sub>.kg<sup>-1</sup> dengan menggunakan metode 1M NH<sub>4</sub>OAc pH 6. Pertukaran ion pada kapur berasal dari konsentrasi ion negatif/kation (KTK) seperti HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dan CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> dan konsentrasi ion positif/anion (KTA) seperti Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; CaHCO<sub>3</sub><sup>+</sup> dan CaOH<sup>+</sup> (Alotaibi *et al.*, 2011).

Kadar Ca pada masing-masing kapur yaitu CaO sebesar 61% Ca; Ca(OH)<sub>2</sub> sebesar 54% Ca; CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> sebesar 53% Ca dan Ca(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> sebesar 48% Ca. Hal ini disebabkan dari kandungan Ca yang dimiliki oleh

masing-masing kapur. Kandungan total  $\text{Ca}^{2+}$  dari  $\text{CaCO}_3$ ;  $\text{CaO}$  dan  $\text{Ca(OH)}_2$  sebesar 5-62%; sedang untuk  $\text{CaMg(CO}_3)_2$  sebesar 2-57%. Kadar Mg hanya terdapat pada  $\text{CaMg(CO}_3)_2$  sebesar 29% Mg. Hal ini disebabkan karena  $\text{CaMg(CO}_3)_2$  yang memiliki kandungan MgO dan diduga dari proses pembentukan dolomit itu sendiri. Dolomit memiliki perbandingan kandungan  $\text{CaO}$  dan  $\text{MgO}$  di dalam senyawa tersebut masing-masing sebesar 31,70%  $\text{CaO}$  dan 20,60%  $\text{MgO}$ . Dolomit yang ideal terdiri dari 54,3% kalsium karbonat dan 45,7% magnesium karbonat. Mineral dolomit murni terdiri dari 45,7%  $\text{MgCO}_3$  dan 54,3%  $\text{CaCO}_3$ ; atau 47,8%  $\text{CO}_2$ ; 21,8%  $\text{MgO}$  dan 30,4%  $\text{CaO}$ . Sedangkan total kandungan total  $\text{Mg}^{2+}$  dari  $\text{CaCO}_3$ ;  $\text{CaO}$  dan  $\text{Ca(OH)}_2$  sebesar 0-12%; sedang untuk  $\text{CaMg(CO}_3)_2$  sebesar 16-34% (Yildirim & Akarsu, 2010).



Gambar 8.2 Ion kompleks dalam proses hidrolisis pada permukaan kapur

Secara umum dengan pemberian kapur ke tanah dapat memengaruhi kesuburan tanah. Bila ditinjau dari sudut kimia, maka tujuan teknologi ameliorasi dengan teknik pengapuran adalah meningkatkan pH, menurunkan Al-dd dan kejenuhan Al.. Kapur sebagai bahan amelioran dari jenis anorganik dapat mengendalikan kemasaman tanah yang paling tepat, efisien, efektif dan ekonomis dalam pengaplikasiannya karena reaksinya sangat cepat dan menunjukkan perubahan kemasaman tanah yang sangat nyata.

Penggunaan dolomit dengan dosis 2.000 kg/ha lebih efektif mempertahankan pH tanah dibandingkan kaptan. Dolomit

mempertahankan pH tanah hingga 17 bulan setelah aplikasi. Nilai pH 17 bulan setelah aplikasi dolomit adalah 6,64; sedangkan pada perlakuan kaptan memiliki pH tanah 5,56. Reaksi dolomit di tanah dalam mempertahankan pH tanah adalah 1, 26 kali lebih efektif dibandingkan kaptan (Basuki & Sari, 2020) dan pemberian kapur 1,0 x Al-dd pada Inceptisol berpengaruh baik terhadap diameter batang, umur muncul bunga, jumlah buah, panjang buah, diameter buah dan berat buah cabai (Eni Miftahul Janah *et al.*, 2020).

Pemberian kapur setara 1\*Al-dd sudah dapat menaikkan pH hingga 5,3-5,4 dan menurunkan kejenuhan Al sampai <30%. pengapuran dengan menggunakan dolomit [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] lebih efektif dalam memperbaiki sifat kimia tanah Ultisols, dibandingkan dengan jenis kapur lainnya [ $\text{CaO}$ ;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;  $\text{CaCO}_3$ ]. Pengaruh dolomit terhadap Al dapat ditukar (1 me Ca 100  $\text{g}^{-1}$ ) memperbaiki sifat kimia tanah Ultisol dari Limau Manis Padang seperti pH  $\text{H}_2\text{O}$  sebesar 0,35 unit, P tersedia sebesar 1,03 ppm, Al dapat ditukar sebesar 0,91  $\text{cmolc kg}^{-1}$ ; H dapat ditukar sebesar 0,92  $\text{cmolc kg}^{-1}$ ; KTK sebesar 10,49  $\text{cmolc kg}^{-1}$ ; K dapat ditukar sebesar 0,03  $\text{cmolc kg}^{-1}$ ; Ca dapat ditukar sebesar 0,44  $\text{cmolc kg}^{-1}$  dan Mg dapat ditukar sebesar 1,34  $\text{cmol kg}^{-1}$ , dibandingkan kontrol (Maulana *et al.*, 2020). Kalsit 1 ton/ha yang dihitung dengan metode Al-dd menghasilkan sifat kimia tanah yang lebih baik dari jenis kapur dengan metode perhitungan lainnya, demikian juga halnya dengan pertumbuhan jagung yang ditanam pada Ultisol (Amelia *et al.*, 2018). Sedangkan, pengaruh sisa amelioran  $\text{CaCO}_3$  dapat mempercepat umur berbunga dan umur panen, menghasilkan panjang malai yang lebih panjang, meningkatkan jumlah anakan maksimum dan berat 1000 butir gabah (Sari & Ariani, 2017).

Penambahan kapur dolomit dengan dosis 2–3 ton  $\text{ha}^{-1}$  meningkatkan pH tanah pascainkubasi 1 minggu. Penggunaan kapur dolomit dengan dosis 3 ton  $\text{ha}^{-1}$  konsisten meningkatkan ( $P < 0,05$ ) tinggi tanaman sejak 2 MST (minggu setelah tanam) dan jumlah daun tanaman sejak 1 MST hingga akhir penelitian (10 MST). Dosis penambahan dolomit sebanyak 3 ton  $\text{ha}^{-1}$  efektif meningkatkan produksi biomassa segar dan biomassa kering dibandingkan kontrol. Hal ini menegaskan bahwa penambahan kapur dolomit dengan dosis 3 ton  $\text{ha}^{-1}$  efektif meningkatkan pH Oxisols, tinggi tanaman, jumlah daun, biomassa segar, dan biomassa kering

tanaman sorgum. Penambahan kapur dolomit menghasilkan tingkat warna hijau daun tanaman sorgum yang lebih baik dibandingkan dengan sorgum kontrol tanpa pengapuran (Prihantoro *et al.*, 2023). Sedangkan efektivitas agronomis relatif (RAE), terhadap aplikasi dolomit memiliki RAE > 95%. Oleh karena itu, dosis optimum dolomit yang dapat diaplikasikan adalah 2 ton ha<sup>-1</sup> pada tanah masam (Chairiyah *et al.*, 2021).

## **8.2. Limbah Pembakaran PLTU (*Fly and Bottom Ash*)**

### **8.2.1. Produksi Fly and Bottom Ash**

Abu terbang batubara (FABA) dihasilkan selama pembakaran batubara di pembangkit listrik tenaga batubara. FABA merupakan produk sampingan industri yang jika tidak dimanfaatkan dengan baik, akan menjadi polutan lingkungan yang diakui. FABA dihasilkan pada suhu 1200-1700 °C dari berbagai konstituen anorganik dan organik dari batubara (Das *et al.*, 2013). Besarnya variasi komponen, FABA merupakan salah satu bahan antropogenik paling kompleks yang dapat dikarakterisasi. Sekitar 316 mineral individu dan 188 kelompok mineral telah diidentifikasi dalam FABA yang berbeda (Palani *et al.*, 2021). Sekitar 750 juta ton FABA dihasilkan secara global dan dari jumlah tersebut hanya 20-50% yang digunakan untuk aplikasi berbagai aspek (Abbass *et al.*, 2022), tak terkecuali untuk pertanian.

### **8.2.2. Fisiko-Kimia Fly and Bottom Ash**

Morfologi partikel FABA dikontrol terutama oleh suhu pembakaran dan laju pendinginan selanjutnya. Analisis pemindaian mikroskop elektron (SEM) telah mengungkapkan bahwa sampel FABA terdiri dari bola padat, bola berongga (*cenospheres*), dan karbon yang tidak terbakar yang tidak beraturan. Agregat mineral yang mengandung partikel korundum, kuarsa, dan magnetit (Lal *et al.*, 2015). Material anorganik dalam batubara memiliki dua mode kemunculan, di mana material tersebut dapat dimasukkan ke dalam partikel organik atau dikeluarkan sepenuhnya sebagai butiran mineral yang terpisah. Langkah pertama dari mekanisme transformasi bahan mineral pembakaran batubara yang diterima secara umum adalah konversi batubara menjadi arang. Bahan-bahan arang yang terbakar pada suhu yang jauh lebih tinggi. Mineral-mineral halus yang

terkandung di dalamnya secara bertahap berkurang pada suhu yang lebih tinggi dan dilepaskan dari dalam arang saat terfragmentasi. Pada titik ini, mineral-mineral tersebut terurai dan berubah menjadi gas dan akhirnya mengembun membentuk partikel abu padat.

Kondensasi homogen menghasilkan partikel abu berukuran antara 0,02-0,2  $\mu\text{m}$  dan fragmentasi bahan mineral yang disertakan menghasilkan pembentukan partikel berukuran antara 0,2-10  $\mu\text{m}$ . Materi mineral yang tidak termasuk mengalami serangkaian transformasi kompleks untuk membentuk partikel yang sebagian besar berbentuk bola dengan kisaran ukuran 10-90  $\mu\text{m}$ . Ukuran partikel yang melebihi 90  $\mu\text{m}$  adalah yang terdiri dari konstituen organik atau komponen batubara yang tidak terbakar (*char*). Telah ditunjukkan bahwa fraksi yang lebih besar dari FABA mengandung lebih banyak partikel karbon. Partikel arang diwakili oleh partikel yang sedikit berubah, *semi-coked*, atau *coked*. Kokas dan semi-kokas dihasilkan dari peleburan lengkap dan parsial dari berbagai komponen organik, sedangkan partikel yang sedikit berubah adalah partikel yang terpapar pada suhu tidak lebih tinggi dari 550 °C. Partikel yang sedikit berubah ini adalah tipikal untuk fraksi berbutir kasar dengan ukuran lebih dari 100  $\mu\text{m}$ . Sementara partikel kokas dan semi-kokas mengalami peleburan dan dengan demikian mengembun sebagai bola dan spheroid, partikel yang lebih kasar mengalami oksidasi yang tidak sempurna, sehingga mempertahankan ketidakteraturan bentuk dari prekursor batubara. Perbedaan densitas komponen FABA berkisar antara 0,79-3,47 (Susanto *et al.*, 2020).

Tabel 8.4 Komposisi kimia FABA berdasarkan jenis batubara

Komponen (%)	Lignit	Sub-bituminus	Bituminus
SiO <sub>2</sub>	15-45	40-60	20-60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-25	20-30	5-35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4-15	4-10	10-40
CaO	15-40	5-30	1-12
MgO	3-10	1-6	0-5
Na <sub>2</sub> O	0-6	0-2	0-4
K <sub>2</sub> O	0-4	0-4	0-3
SO <sub>3</sub>	0-10	0-2	0-4
LOI	0-5	0-3	0-15

Sumber: (Fuller *et al.*, 2018)

Komponen utama dari FABA adalah silika, alumina, besi oksida, dan kalsium oksida dengan jumlah karbon yang bervariasi yang diukur dengan uji Loss on Ignition (LOI) (Tabel 8.4). Komposisi kimia *bulk* FABA yang mengandung berbagai macam oksida logam dengan urutan  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{TiO}_2$ . Kimia FABA ditentukan oleh jenis batubara yang dibakar untuk memproduksinya. Secara umum telah diamati bahwa FABA dari batubara Sub-bituminus dan lignit dicirikan oleh kandungan CaO, MgO, dan  $\text{SO}_3$  yang lebih tinggi serta  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar bermutu lebih tinggi seperti batubara bituminus dan antrasit (Fuller *et al.*, 2018). FABA bitumen dan lignit yang mengandung kurang dari 10% CaO secara total sering kali terdiri dari kaca aluminosilikat dan biasanya tidak mengandung senyawa kristal kalsium. FABA yang mengandung lebih dari 15% total (Samosir & Har, 2021).

Komposisi FABA yang kompleks menjadi hal yang menarik untuk terus dikembangkan sesuai dengan pemanfaatan yang diharapkan. Kapasitas adsorpsi arang dalam FABA dapat menguntungkan dalam aplikasi pengendalian polusi. Hal ini menegaskan bahwa, meskipun kompleks komposisi FABA sebagian besar mengandung beberapa campuran kaca, kuarsa-mullite, arang, Ca silikat-oksihidroksida, kaya zat besi, dan fraksi garam dalam bentuk yang dapat dipisahkan menggunakan berbagai teknik dalam proses pemisahan berurutan untuk mengarakterisasi sepenuhnya fraksi FABA berikut: (1) konsentrat *cenosphere* keramik; (2) konsentrat garam yang larut dalam air; (3) konsentrat *magnetic*; (4) konsentrat *char* (5) konsentrat berat; dan (6) residu FABA yang lebih baik (Ge *et al.*, 2018).

### **8.2.3. Aplikasi Fly and Bottom Ash dalam Bidang Pertanian**

FABA telah digunakan sebagai penstabil tanah karena sifat-sifat menguntungkan yang diberikannya. Diperkirakan bahwa penambahan FABA ke dalam tanah mengubah mineralogi karena reaksi pozzolan. Penggunaan FABA sebagai agen ameliorasi tanah untuk berbagai tujuan yang beragam. Mayoritas tanaman lebih menyukai tingkat pH 6,5-7 untuk pertumbuhan yang optimal. Oleh karena itu, aplikasi FABA, yang dapat bersifat basa atau asam, ke tanah menghasilkan aksi penyangga oleh

FABA. Penambahan FABA yang bersifat basa ke tanah yang bersifat asam dapat meningkatkan pH. Hal ini dijelaskan oleh pelepasan ion Ca, Na, Al, dan OH dalam kondisi ini. Kemampuan FABA untuk meningkatkan pH tanah asam dengan kandungan CaO yang tinggi (>15%), dan diaplikasikan dengan dosis yang sangat tinggi. Sedangkan FABA dengan kandungan CaO yang rendah memiliki potensi yang terbatas untuk memperbaiki keasaman tanah dengan pengecualian pada abu yang mengandung kandungan kalsium yang relatif tinggi (Sahu *et al.*, 2017).

Pengaruh yang menguntungkan lainnya dari penerapan sistem tanah dengan FABA dapat mengurangi kepadatan tanah; meningkatkan aerasi tanah, perkolasi, dan retensi air di zona yang diolah; mengurangi pembentukan kerak; mengurangi konsumsi agen ameliorasi tanah lainnya seperti pupuk atau kapur; berfungsi sebagai insektisida; dan dapat mengurangi mobilitas dan ketersediaan logam di dalam tanah (Kishor *et al.*, 2010, Winarno *et al.*, 2019)

Pengaplikasian abu terbang yang tersubstitusi dengan *phosphogypsum* dengan pupuk kimia pada Inceptisol dapat meningkatkan sifat fisika-kimia tanah dan meningkatkan kualitas tanaman gandum. Aplikasi 15 t ha<sup>-1</sup> FA dan 2 t PG ha<sup>-1</sup> dengan 75% dosis pupuk yang direkomendasikan secara signifikan meningkatkan hasil gabah dan atribut hasil yaitu; jumlah anakan, tinggi tanaman, dan kandungan klorofil gandum. Serapan N, P, K, Ca, Mg dan S maksimum pada biji dan jerami gandum diamati secara signifikan lebih unggul dengan aplikasi perlakuan yaitu 75% RDF + 15 t ha<sup>-1</sup> FA + 2 t PG ha<sup>-1</sup> (Meena *et al.*, 2019).

Pemberian abu terbang pada pertumbuhan tanaman jagung pada Ultisol terdapat adanya peningkatan pH tanah, namun masih menunjukkan nilai di bawah 5,5. Nilai pH tanah yang masih diduga karena dosis yang ditambahkan belum cukup untuk meningkatkan pH tanah di atas 5,5. Penambahan abu terbang batubara dan kotoran ayam sebanyak 20 t h<sup>-1</sup> memberikan ketersediaan P tertinggi dan menunjukkan nilai serapan hara P tertinggi oleh tanaman jagung. Aplikasi abu terbang batubara dan kotoran ayam dapat meningkatkan ketersediaan P lebih baik dibandingkan tanpa penambahan kotoran ayam. Namun, pemberian abu terbang batubara hingga 20 t h<sup>-1</sup> juga menghambat pertumbuhan jagung ditandai dengan penurunan hasil pengukuran berat kering dan tinggi tanaman jagung.

Pertumbuhan terhambat diduga karena adanya pengaruh logam berat Cr yang terkandung dalam abu terbang batubara (Falah *et al.*, 2023).

Pengaruh pemberian abu terbang bagi pertumbuhan dan produksi tanaman padi pada Oxisol terjadi peningkatan nilai pH tanah dan ketersediaan P melalui aplikasi takaran 20, 40, 60 ton ha<sup>-1</sup> terjadi sedikit peningkatan nilai pH sebesar masing-masingnya 0,23; 0,37; 0,42 satuan yang termasuk ke dalam kriteria sangat masam. Peningkatan pH terjadi karena abu batubara mengandung CaO dan MgO, di mana CaO dan MgO dapat menetralkan ion-ion H<sup>+</sup> yang berasal dari dalam tanah dengan demikian semakin tinggi takaran abu batubara yang diberikan, maka semakin besar jumlah CaO dan MgO yang diberikan ke dalam tanah, sehingga penetralan ion-ion H<sup>+</sup> yang berasal dari dalam tanah juga semakin banyak. Peningkatan ketersediaan P seiring dengan peningkatan perlakuan abu batubara. Peningkatan maksimum terjadi pada perlakuan 60 ton ha<sup>-1</sup> dengan nilai sebesar 8,67 ppm dibandingkan dengan tanpa perlakuan. Hal ini diduga karena silikat dapat menggantikan posisi P yang berada pada tapak jerapan, sehingga anion P akan dikeluarkan ke dalam larutan tanah dan tapak jerapan akan ditempati oleh silikat. Pemberian abu batubara sebagai sumber silika berarti semakin banyak Si diberikan, maka sebagian Si akan terserap pada tapak jerapan dan sebagian akan tetap larut dalam larutan tanah, namun kejadian ini memberikan pengaruh yang positif terhadap ketersediaan P. Pengaruh terhadap Ca-dd dan Mg-dd terhadap pemberian abu batubara juga meningkat seiring dengan peningkatan takaran perlakuan, walaupun pada kriteria yang masih rendah (Prasetyo *et al.*, 2010).

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbass, W., Abbas, S., Aslam, F., Ahmed, A., Ahmed, T., Hashir, A., & Mamdouh, A. (2022). Manufacturing of Sustainable Untreated Coal Ash Masonry Units for Structural Applications. *Materials*, 15(11), 21. <https://doi.org/10.3390/ma15114003>
- Al Omari, M. M. H., Rashid, I. S., Qinna, N. A., Jaber, A. M., & Badwan, A. A. (2016). Calcium Carbonate. In *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology* (1st ed., Vol. 41). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.podrm.2015.11.003>
- Alfayed, M. R. D., Nuraini, S., & Rizqi, A. H. F. (2020). Sebagai Potensi Batuan Reservoir Berdasarkan Analisis Porositas Dan Petrografi Pada Formasi Prupuh,. *Geoda*, 01(01), 79–85.
- Alotaibi, M. B., Nasr-El-Din, H. A., & Fletcher, J. J. (2011). Electrokinetics of Limestone and Dolomite Rock Particles. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 14(5), 594–603. <https://doi.org/10.2118/148701-PA>
- Amelia, D., Muyassir, M., & Khalil, M. (2018). Analisis Metode Kebutuhan Kapur pada Ultisol dan Hubungannya dengan Sifat Kimia Tanah dan Pertumbuhan Jagung (*Zea mays L.*). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 3(1), 443–452. <https://doi.org/10.17969/jimfp.v3i1.6420>
- Arroyo-De Dompablo, M. E., Ponrouch, A., Johansson, P., & Palacín, M. R. (2020). Achievements, Challenges, and Prospects of Calcium Batteries. *Chemical Reviews*, 120(14), 6331–6357. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00339>
- Basuki, B., & Sari, V. K. (2020). Efektifitas Dolomit Dalam Mempertahankan pH Tanah Inceptisol Perkebunan Tebu Blimbing Djatiroto. *Buletin Tanaman Tembakau, Serat & Minyak Industri*, 11(2), 58. <https://doi.org/10.21082/btsm.v11n2.2019.58-64>
- Chairiyah, R. R., Ramija, K. E., & Batubara, S. F. (2021). Liming of acid soil and the interaction with soil pH and corn productivity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 807(4), 9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/4/042071>
- Danovaro, R., Company, J. B., Corinaldesi, C., D'Onghia, G., Galil, B., Gambi, C., Gooday, A. J., Lampadariou, N., Luna, G. M., Morigi,

- C., Olu, K., Polymenakou, P., Ramirez-Llodra, E., Sabbatini, A., Sardá, F., Sibuet, M., & Tselepides, A. (2010). Deep-sea biodiversity in the Mediterranean Sea: The known, the unknown, and the unknowable. *PLoS ONE*, 5(8), 25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011832>
- Das, B. K., Choudhury, B. H., & Das, K. N. (2013). Effect of Integration of Fly Ash with Fertilizers and FYM on Nutrient Availability, Yield and Nutrient Uptake of Rice in Inceptisols of Assam, India. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 2(11), 190–208.
- Eni Miftahul Janah, Idwar, & Armaini. (2020). Pengaruh Kapur Pada Media Tanam Terhadap Pertanaman Cabai Merah. *Dinamika Pertanian*, 36(1), 45–54. [https://doi.org/10.25299/dp.2020.vol36\(1\).5367](https://doi.org/10.25299/dp.2020.vol36(1).5367)
- Falah, M. M., Ustiatik, R., & Nuraini, Y. (2023). Pengaruh Penambahan Abu Terbang Batu Bara Dan Pupuk Kandang Ayam Terhadap Serapan P Dan Pertumbuhan Tanaman Jagung Pada Ultisol. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 10(2), 381–391. <https://doi.org/10.21776/ub.jtstl.2023.010.2.21>
- Fauzielly, L., & Hamdani, A. H. (2015). Analisis Lingkungan Pengendapan Batugamping Berdasarkan Distribusi Unsur Kimia Di Daerah Cidora, Kecamatan Ajibarang, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah. *Bulletin of Scientific Contribution*, 13(1957), 202–212.
- Fernando, Y., Syafri, I., & Jambak, M. A. (2015). Fasies Dan Lingkungan Pengendapan Batugamping Formasi Parigi Di Daerah Pangkalan, Karawang, Jawa Barat. *Bulletin of Scientific Contribution*, 13(April), 30–43.
- Fuller, A., Maier, J. rg, Karampinis, E., Kalivodova, J., Grammelis, P., Kakaras, E., & Scheffknecht, G. nter. (2018). Fly ash formation and characteristics from (co-)Combustion of an herbaceous biomass and a Greek lignite (Low-Rank Coal) in a pulverized fuel pilot-scale test facility. In *Energies* (Vol. 11, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/en11061581>

- Ge, J. C., Yoon, S. K., & Choi, N. J. (2018). Application of Fly Ash as an adsorbent for removal of air and water pollutants. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(7), 24. <https://doi.org/10.3390/app8071116>
- Haldar, S. K. (2020). Mineral deposits: host rocks and genetic model. In *Introduction to Mineralogy and Petrology*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820585-3.00009-0>
- Herman, J. S. (2019). Water chemistry in caves. In *Encyclopedia of Caves, Third Edition* (3rd ed., Issue 2). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814124-3.00133-3>
- Jiang, B., Xia, D., Yu, B., Xiong, R., Ao, W., Zhang, P., & Cong, L. (2019). An environment-friendly process for limestone calcination with CO<sub>2</sub> looping and recovery. *Journal of Cleaner Production*, 240, 33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118147>
- Kępnia, M., Woyciechowski, P., & Franus, W. (2017). Chemical and Physical Properties of Limestone Powder as a Potential Microfiller of Polymer Composites. *Archives of Civil Engineering*, 63(2), 67–78. <https://doi.org/10.1515/ace-2017-0017>
- Kishor, P., Ghosh, A., & Kumar, D. (2010). Use of fly ash in agriculture: A Way to Improve Soil Fertility and Its Productivity. *Asian Journal of Agricultural Research*, 4(1), 1–14.
- Lal, B., Samadhiya, V. K., Dewangan, T., & Sharma, P. (2015). Impact of Combined Application of Fly Ash and Fym on. *The Ecoscan*, 9(3), 761–764.
- Lewicka, E., Szlugaj, J., Burkowicz, A., & Galos, K. (2020). Sources and markets of limestone flour in poland. *Resources*, 9(10), 1–16. <https://doi.org/10.3390/resources9100118>
- Maulana, A., Herviyanti, H., & Budi Prasetyo, T. (2020). Pengaruh Berbagai Jenis Kapur Dalam Aplikasi Pengapuran Untuk Memperbaiki Sifat Kimia Ultisol. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 7(2), 209–214. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2020.007.2.04>
- Meena, R. K., Meena, R., & Ram, B. (2019). *Effect of fly ash, phosphogypsum and chemical fertilizers on growth, yield and nutrient uptake of wheat (Triticum aestivum L.) in inceptisol*. 8(5), 733–736.

- Palani, G., Arputhalatha, A., Kannan, K., Lakkaboyana, S. K., Hanafiah, M. M., Kumar, V., & Marella, R. K. (2021). Current trends in the application of nanomaterials for the removal of pollutants from industrial wastewater treatment—a review. *Molecules*, 26(9), 16. <https://doi.org/10.3390/molecules26092799>
- Praptisih, P., Siregar, M. S., Kamtono, K., Hendrizan, M., & Putra, S. (2012). Fasies Dan Lingkungan Pengendapan Batuan. *Riset Geologi Dan Pertambangan*, 22(1), 33–43.
- Prasetyo, T. B., Yasin, S., & Yeni, E. (2010). Pengaruh Pemberian Abu Batubara Sebagai Sumber Silika (SI) Bagi Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Padi (*Oryza sativa* L). *Jurnal Solum*, 7(1), 1. <https://doi.org/10.25077/js.7.1.1-6.2010>
- Prihantoro, I., Permana, A. T., Suwanto, S., 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*, 28(2), 297–304. <https://doi.org/10.18343/jipi.28.2.297>
- Sahu, G., Ghosh Bag, A., Chatterjee, N., Kumar Mukherjee, A., & Gayatri Sahu, C. (2017). Potential use of flyash in agriculture: A way to improve soil health. ~ 873 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 873–880.
- Samosir, G. B. G., & Har, R. (2021). Pemanfaatan Fly Ash Bottom Ash Dan Tawas Untuk Menetralkan Air Asam Tambang. *Jurnal Bina Tambang*, 6(4), 102–111.
- Sandström, K., Broström, M., & Eriksson, M. (2021). Coal ash and limestone interactions in quicklime production. *Fuel*, 300, 13. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120989>
- Sari, N. A., & Ariani, E. (2017). Pengaruh Sisa Amelioran (Kapur Kalsit dan Batuan Fosfat Alam) di Medium Ultisol Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Beberapa Varietas Padi Gogo (*Oryza sativa* L.). *JOM FAPERTA*, 4(1), 1–15.
- Skipper, P. J. A., Skipper, L. K., & Dixon, R. A. (2022). A metagenomic analysis of the bacterial microbiome of limestone, and the role of associated biofilms in the biodeterioration of heritage stone

- surfaces. *Scientific Reports*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08851-4>
- Sulastoro. (2013). Karakteristik Sumberdaya Air di Daerah Karst (Studi Kasus Daerah Pracimantoro). *Jurnal of Rural and Development*, 4(1), 61–67.
- Susanto, I., Irawan, R. R., Ronny, Y., & Gunawan, G. (2020). Coal Ash Waste Utilization for Environmentally Friendly Road Pavement Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 448(1), 8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012116>
- Winarno, H., Muhammad, D., & Wibowo, Y. G. (2019). Pemanfaatan Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash Dari Pltu Sumsel-5 Sebagai Bahan Utama Pembuatan Paving Block. *Jurnal Teknika*, 11(1), 1067. <https://doi.org/10.30736/jt.v11i1.288>
- Yildirim, M., & Akarsu, H. (2010). Preparation of Magnesium Oxide (MgO) From Dolomite by Leach-precipitation-pyrohydrolysis Process. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 44(January), 257–272.
- Zajac, M., Skocek, J., Haha, M. Ben, & Deja, J. (2022). CO2 Mineralization Methods in Cement and Concrete Industry. *Energies*, 15(10), 1–26. <https://doi.org/10.3390/en15103597>

## BAB IX

---

# PRODUKTIVITAS TANAH MINERAL MASAM

Produktivitas suatu lahan berkaitan dengan produksi per satuan luas lahan per komoditas tanaman per waktu (musim tanam). Salah satu indikator yang menandai tingginya produksi lahan tersebut adalah tingkat kesuburan tanahnya. Tanah menjadi pembatas produktivitas tanaman dilihat dari karakteristik fisika, kimia dan biologinya. Pembatas utama pertumbuhan tanaman pangan pada lahan kering masam, antara lain tingkat kemasaman yang tinggi, kandungan C-organik rendah, kandungan hara makro rendah, dan kandungan Al dapat dipertukarkan tinggi. Pengelolaan lahan kering masam di tingkat petani tidak optimal dan belum didasarkan pada karakteristik tanah dan kebutuhan hara tanaman (Kasno, 2019).

Faktor pembatas budidaya tanaman di lahan kering masam adalah pH tanah yang rendah dan kejenuhan Al tinggi (Kasno *et al.*, 2013, Suhartina *et al.*, 2014, Lubis *et al.*, 2014, Efendi *et al.*, 2015). Keracunan Al erat kaitannya dengan kemasaman tanah akibat pH rendah (Alluri, 1986). Tanaman keracunan Al juga mengalami kekahatan hara N, P, K Ca, dan Mg, sehingga pertumbuhan kerdil dan tidak mampu berproduksi. Kejenuhan Al tinggi membatasi penetrasi akar untuk mendapatkan hara. Perkembangan akar yang buruk mengakibatkan defisiensi hara, sehingga menurunkan hasil gabah (Bian *et al.*, 2013). Penggunaan varietas toleran Al berperan penting dalam budidaya tanaman pada lahan suboptimal (tanah mineral masam).

Produktivitas tanaman pangan pada lahan kering masam umumnya rendah juga karena tingkat pengelolaannya tidak berdasarkan pada karakteristik tanah. Tanah mineral masam atau yang berada pada lahan kering masam mempunyai karakteristik-karakteristik tanah yang miskin hara sehingga tanaman sulit berkembang untuk mendapatkan produktivitas tanaman yang optimal. Secara umum lahan kering masam mempunyai

tingkat kesuburan dan produktivitas lahan rendah. Untuk mencapai produktivitas optimal diperlukan input yang cukup tinggi (Mulyani, 2013).

Peningkatan atau optimalisasi produktivitas lahan kering masam seringkali terbentur pada kendala sosial ekonomi. Kapasitas petani dalam berusaha tani pada lahan kering masam relatif tertinggal dibandingkan pada lahan sawah. Aspek pendukung teknologi pada lahan kering masam belum seintensif pada lahan sawah. Dukungan kelembagaan masih jauh dari memadai, salah satu dampaknya akses petani terhadap input produksi menjadi sulit, sehingga upaya untuk menerapkan teknologi budidaya seringkali terbentur pada ketersediaan modal usahatani yang rendah. Hal ini memungkinkan produksi yang dicapai tidak optimal, lahan yang dikelola mudah terdegradasi, karena pengelolaan lahan tanpa menggunakan kaidah konservasi tanah (Erfandi, 2013).

Beberapa jenis tanaman yang biasanya dibudidayakan pada lahan kering masam yaitu kedelai, padi, jagung.

### **9.1. Kedelai**

Kedelai merupakan tanaman pangan yang biasa ditanam pada musim tanam kedua atau ketiga. Tanaman ini merupakan tanaman yang peka terhadap kemasaman tanah terutama kejenuhan Al. Batas toleransi pH tanah terhadap hasil kedelai untuk tanah Ultisol, Oxisol dan Inceptisol adalah 4,7 sementara batas kejenuhan Al untuk Ultisol adalah 10% dan untuk Oxisol dan Inceptisol 15% (Wade *et al.* 1986). Dalam upaya pengembangan kedelai di lahan kering masam, serta guna mendapatkan produktivitas kedelai yang optimal perlu didukung oleh tindakan rehabilitasi lahan terlebih dahulu atau dengan mengembangkan varietas yang adaptif pada kondisi lahan masam (Nurida *et al.*, 2015). Upaya rehabilitasi ini akan menunjang populasi mikroba sebagai pembantu peningkatan jumlah unsur hara di dalam tanah. Pemberian bahan organik secara vertikal mampu meningkatkan populasi cacing tanah (*Pheretima hupiensis*) tinggi dan positif terhadap produksi kedelai (Subowo *et al.*, 2003).

Pertumbuhan kedelai yang optimal dicapai jika pH tanah adalah 6,8, namun pH tanah 5,5-6,0 sudah dianggap cukup baik untuk bertanam kedelai di Indonesia (Ismail dan Effendi 1985). Nilai kritis pH tanah untuk

tanaman kedelai berkisar antara 4 hingga 5,5 (Follet *et al.* 1981). Tanaman kedelai merupakan tanaman yang tidak tahan terhadap kejenuhan Al tinggi dengan nilai kritis kejenuhan aluminium 30% (Hartatik dan Adiningsih 1987).

Penggunaan varietas kedelai toleran lahan masam telah dimulai pada tahun 2001, dengan dilepas tiga varietas kedelai adaptif lahan masam, yaitu Tanggamus, Sibayak dan Nanti (Arsyad dan Purwantoro, 2010). Hasil kedelai di Tulang Bawang dan Lampung Tengah dari ketiga varietas (Tanggamus, Sibayak dan Willis) rata-rata masih kurang dari 1,0 ton/ha (Taufiq dan Manshuri, 2005). Kemudian, berdasarkan hasil penelitian Fiantis (1989) *cit* Haryanti (2010) pemupukan pada tanah Oxisol Padang Siantah sampai dengan 150 Kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha belum memengaruhi pertumbuhan dan produksi kedelai, karena tingginya kapasitas sorpsi P pada tanah ini, sehingga pupuk P yang diberikan lebih cepat terjerap pada matrik tanah, sebelum tanaman menyerap P dari pupuk yang diberikan. Oleh karena itu diperlukan input berupa kapur dalam upaya penurunan kadar Al pada tanah supaya P kembali bisa disuplai ke tanaman. Pemberian kapur dengan takaran ½ dan ¾ kali Al-dd dapat menurunkan Al-dd dan kejenuhan Al pada tanah dengan Al tinggi dan pH rendah (Amien dan Sudjadi 1985).

Sudaryono *et al.* (2011) pada lahan kering masam Rumbia, Lampung Tengah dengan kandungan Al-dd awal pada lapisan tanah 0-20 cm hanya 0,44 dan 0,88 me/100 gr, lalu diaplikasikan dolomit 300-450 kg/ha dan pupuk kandang 500-1.000 kg/ha, hasil kedelai yang diperoleh sekitar 2,0-2,09 ton/ha. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Nurida (2015) menunjukkan bahwa aplikasi Biochar SP50 Submikron (Biochar sekam padi ukuran < 100 µm) pada Ultisol memberikan pertumbuhan yang stabil dan hasil kedelai mencapai 1,50 ton/ha dengan dosis yang efisien sekitar 1,5 ton/ha. Berdasarkan capaian biji kedelai yang dihasilkan, budidaya kedelai di lahan kering masam cukup prospektif jika diaplikasikan pembenah tanah dengan kualitas tertentu dan didukung oleh varietas kedelai yang adaptif.

Hal yang sama juga terjadi ketika lahan kering masam yang diberi kapur ditanami kedelai. Pertumbuhan kedelai menjadi lebih optimal dengan adanya peranan kapur dalam menetralkan Al pada lahan kering masam. Hasil penelitian Taufiq *et al.* (2004) menunjukkan bahwa

penambahan kapur dolomit setara 0,25 x Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau 259 kg CaO/ha meningkatkan hasil kedelai sebesar 75% dari 0,8 menjadi 1,4 t/ha di lahan kering Tulang Bawang, Lampung dan meningkatkan hasil sebesar 42,8% dari 1,4 t/ha menjadi 2,0 t/ha di lahan kering Lampung Tengah, Lampung. Rumbaina *et al.* (2004) juga menyarankan pemberian kapur dolomit setara 500 kg CaO/ha untuk lahan kering masam yang akan ditanami kedelai.

Selain kapur, *ameliorant* lain seperti biochar juga potensial untuk peningkatan hasil panen tanaman kedelai. Sesuai yang telah dijelaskan pada BAB VII, biochar mampu meningkatkan kesuburan tanah untuk produktivitas tanaman. Tanaman kedelai yang dipanen saat masih muda atau disebut juga tanaman edamame berdasarkan hasil penelitian Hidayati (2021) meningkat produktivitasnya yang ditandai dengan peningkatan pertumbuhan tinggi tanaman edamame yaitu pada perlakuan pemberian biochar limbah kelapa muda sebesar 9,37 cm, meningkatkan kandungan hara P sebesar 0,009% (batang+daun) dan 0,007% (akar), meningkatkan kandungan hara K sebesar 0,083 (batang+daun) dan 0,065% (akar), produksi polong meningkat sebesar 8,20 kg/petak dan berat kering 100 biji meningkat sebesar 21,85 g.

## 9.2. Jagung

Produktivitas lahan untuk tanaman jagung berhubungan erat dengan kualitas lahan, terutama retensi hara dan bahaya keracunan Al, dipengaruhi oleh bahan induk dan tingkat perkembangan tanah. Ketersediaan hara lebih banyak dipengaruhi oleh pengelolaan lahan dan input yang diberikan pada tanah. Penggunaan lahan yang intensif dan pemberian pupuk yang terus-menerus menyebabkan kandungan unsur hara pada tanah lapisan atas tinggi dan hasil jagung yang diperoleh juga tinggi.

Pemberian kombinasi 30 ton pupuk kandang/ha, 14 kg hara mikro dan pemberian kapur untuk mencapai kejenuhan Al 10% menghasilkan berat segar dan berat kering trubus jagung tertinggi (Indrasari dan Syukur, 2006). Pemberian kompos tanaman *Gliricidia* dan *Tithonia* 20 ton/ha nyata meningkatkan berat kering tanaman jagung, peningkatan pH mendekati pH 5,5 (Wahyudi, 2009). Pemberian bahan organik dan pupuk anorganik dapat meningkatkan produksi kedelai dan ubi kayu dibandingkan hanya menggunakan pupuk anorganik (Muzaijanah dan Subandi, 2016).

Produksi jagung pada tanah Ultisol dan Oxisol daerah Panyipatan, Tanah Laut yang mempunyai pH 4,4 dan 4,1 serta kandungan C-organik, hara N, P, dan K rendah adalah 3,5 dan 3,6 ton/ha (Suastika *et al.*, 2004). Pengelolaan lahan kering untuk jagung di Bagan Pete, Kotabaru, Jambi oleh petani dipupuk dengan 100 kg Urea, 100 kg SP-36 dan 75 kg KCl/ha, hasil yang diperoleh masih cukup rendah, yaitu 4,0 ton/ha (Edi dan Salvia 2009). Total biomasa dan hasil biji kering jagung pada lahan kering di Tamanbogo, Lampung Timur yang dipupuk 5 ton/ha pupuk kandang, 300 kg urea, 187,5 kg SP-36 dan 75 kg KCl/ha belum bisa optimal, masing-masing hanya 4,73 dan 4,21 ton/ha, sementara yang hanya ditambah 5 ton pupuk kandang/ha hanya menghasilkan total biomasa dan berat biji kering 1,42 dan 1,46 ton/ha (Sulaeman *et al.*, 2017).

Pemupukan tanaman jagung pada lahan kering masam dengan 200 kg Urea, 100 kg SP-36, 100 kg KCl dan bahan organik 1 ton/ha dapat meningkatkan hasil jagung 1,32 ton/ha (31,73%) dibandingkan praktik petani yang dipupuk dengan 100 kg Urea, 100 kg SP-36 dan 75 kg KCl/ha (Edi dan Salvia, 2009). Pemupukan P pada tanah masam yang diberikan kapur 518 kg/ha (0,5 x Al-dd) nyata meningkatkan efektivitas pemupukan P dari 94 menjadi 110% (Taufiq dan Manshuri, 2005).

Distribusi biomassa tanaman jagung P 27 yang diperlakukan dengan pupuk kandang sebanyak 5 t/ha disertai dengan pupuk anorganik pada dosis 50% dan 75% menunjukkan variasi yang proporsional pada setiap bagian tanaman. Berat total biomassa jagung pada perlakuan pupuk organik disertai dengan pupuk anorganik pada dosis 50% dan 75% nyata lebih tinggi dibandingkan dengan hanya diperlakukan dengan pupuk kandang saja. Pemberian pupuk kandang disertai dengan pemupukan NPK pada dosis 50% dan 75% meningkatkan berat setiap bagian tanaman jagung secara nyata sehingga total berat biomassa meningkat dari 1,30-1,42 t/ha menjadi 4,58-4,73 t/ha. Pemupukan 50% NPK pada pemberian 5 ton/ha pupuk kandang nyata meningkatkan hasil biji kering jagung dari 1,46 menjadi 4,01 ton/ha atau meningkat 175% (Sulaeman *et al.*, 2017). Oleh karena itu, perlakuan pupuk kandang dikombinasikan dengan 50% pupuk anorganik atau pupuk buatan secara teknis lebih baik karena dapat menghemat pupuk anorganik sebanyak 50%.

Produktivitas jagung tertinggi dicapai di Jawa dengan produktivitas berkisar antara 5,48-5,93 ton/ha (BPS 2018). Tren peningkatan tertinggi terjadi antara tahun 2011 dan 2012, sedangkan pada tahun selanjutnya telah terjadi produksi yang sudah tidak meningkat atau sama dari tahun ke tahun. Sedangkan produksi rendah terjadi di Kalimantan, Papua dan Maluku, rendahnya produktivitas jagung dipengaruhi oleh rendahnya produktivitas tanah, kondisi iklim dan tingkat pengelolaan oleh petani. Perbedaan produktivitas tanah antara Jawa dan luar Jawa disebabkan oleh perbedaan tingkat kesuburan tanah dan tingkat pengelolaan oleh petani. Hasil jagung pada lahan kering tanah Ultisol di Desa Keban, Lahat yang dikelola oleh petani 4,12 ton/ha (Thamrin dan Hutapea, 2016).

Menurut Sukma (2021) aplikasi *biochar* bambu metode Kon-tiki dengan dosis 10 ton/ha setara 20 kg per petak, mampu meningkatkan tinggi tanaman sebesar 48 cm, kadar hara P batang + daun dan akar masing-masing meningkat sebesar 4,7% dan 0,87%, berat kering 100 biji dan produksi jagung per petak meningkat masing-masing sebesar 11 gr dan 2,9 kg, jika dibandingkan dengan kontrol. Hasil tanaman jagung metode Kon-tiki memiliki produksi sebesar 24 kg/20 m<sup>2</sup> setara dengan 9,6 ton/ha. Produksi jagung per hektare hampir memenuhi perkiraan hasil yang ada.

### **9.3. Padi Gogo**

Padi gogo atau padi ladang sebenarnya cukup potensial untuk dikembangkan di lahan kering masam karena tidak memerlukan tempat tumbuh berupa drainase dan irigasi yang baik sehingga cocok dikembangkan di lahan kering masam. Namun, kondisi tanah yang masam masih menjadi kendala yang perlu dipertimbangkan dalam pengelolaan padi gogo tersebut. Kendala tersebut berupa kesuburan tanah yang rendah, peka terhadap erosi, kekeringan, kemasaman tanah, miskin bahan organik, fiksifosfat tinggi, dan serangan penyakit.

Produktivitas padi di Bongo, Sarmi, Papua dengan Varietas Situbagendit yang dipupuk 50 kg Urea dan 100 kg Phonska/ha adalah 1,8 ton/ha (Beding *et al.*, 2017). Produktivitas padi gogo varietas Towuti dan Situbagendit yang ditanam di Kebun Percobaan Samboja, BPTP Kaltim, Kutai Kertanegara masing-masing 1,29 dan 1,90 ton/ha (Danial dan

Nurbani 2015). Hal yang sama disampaikan oleh Sujitno *et al.* (2011) bahwa hasil padi varietas lokal yang ditanam petani di Desa Jatiwangi, Pakenjeng, Garut masih sangat rendah yaitu 1,8 ton/ha, sementara penggunaan varietas unggul dapat meningkat menjadi 2,8-4,5 ton/ha. Hasil padi gogo di Konawe Varietas Inpago LIPI Go 2, Inpago LIPI Go1 dan Kolono yang dipupuk dengan dosis anjuran masing-masing adalah 3,8; 3,2 dan 3,0 ton/ha (Mulyaningsih *et al.*, 2015). Hasil Kajian Purnomo (2004) menunjukkan bahwa dengan aplikasi pupuk organik pabrikan 1000 kg/ha dapat meningkatkan hasil gabah kering panen sekitar 14% dibandingkan tanpa pupuk organik.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Barus (201) dengan menambahkan pupuk kandang pada tanah menunjukkan bahwa hasil gabah kering panen lebih tinggi (4,25 ton/ha) dibandingkan tanpa pupuk kandang (3,55 ton/ha).

Aplikasi pupuk hayati berbasis bakteri pemacu tumbuh dari kelompok *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Azospirillum sp.*, dan *Azotobacter sp.* telah terbukti dapat memacu pertumbuhan dan produksi padi dan jagung di rumah kaca dan di lapangan (Hamim *et al.* 2008). Aplikasi pupuk hayati tersebut juga diujikan oleh Fadiluddin (2009) pada tanaman padi gogo di lahan Ultisol yang digunakan untuk memperkaya kompos dapat meningkatkan jumlah malai per rumpun, jumlah gabah per rumpun, bobot gabah isi per rumpun, dan bobot 1.000 biji. Perlakuan pupuk hayati yang terdiri dari isolat tersebut diaplikasikan pada padi sawah dan dikombinasikan dengan kompos dan NPK dosis 50% dapat meningkatkan produksi dibandingkan dengan penggunaan NPK dosis 100% (Iqbal, 2008).

Perlakuan kompos yang diperkaya mikroba dapat memacu pertumbuhan dan produksi padi sawah dan gogo di tanah masam. Perlakuan kompos diperkaya 7 isolat mikrob (*Bacillus* galur DM4, *Pseudomonas* galur PD13 dan P3A2, *Azospirillum* galur (IDM3 dan BGR22), dan *Azotobacter* galur 23TC dan 23TB) dan penambahan NPK dosis 50% memberikan hasil tertinggi. Penggunaan pupuk hayati dapat mengurangi penggunaan 50% dosis pupuk NPK. Penggunaan kompos diperkaya mikrob dapat meningkatkan kualitas tanah masam (Aryanto, 2015).

#### 9.4. Kopi

Perkebunan kopi berdasarkan status pengusahaannya terdiri atas 96% perkebunan rakyat, 2% perkebunan swasta, dan 2% perkebunan negara. Luas areal kebun kopi di Indonesia pada tahun 2011 adalah 1 233 698 ha dengan produksi 638,646 ton, produktivitas 624.2 kg/ha, nilai ekspor yang dihasilkan US\$1036.671 juta dari volume ekspor 346.493 ton. Luas areal kebun kopi di Indonesia tahun 2015 adalah 1.230.001 ha dengan produksi 639.21 ton, produktivitas 920.69 kg ha<sup>-1</sup>, nilai ekspor yang dihasilkan US\$1 197.735 juta dari volume ekspor 502 021 ton (Ditjenbun, 2016).

Tabel 9.1 Produktivitas kopi pada beberapa kepulauan besar di Indonesia

Pulau di Indonesia	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Sumatra	6,845	6,646	6,851	7,119	7,472	8,173
Jawa	3475.266	3446	3148.49	3071.492	3349.838	3276.375
Kalimantan	1673.82	1723	1725.115	1606.457	1672.626	1711.781
Bali dan Nusa Tenggara	1967.888	1993	2058.642	2031.911	2015.056	2047.3
Sulawesi	4009.298	3416	3346.528	3282.912	3354.063	3201.815
Maluku dan Papua	1654.109	1464	1728.183	1647.141	1454.17	1786.734

Sumber: (Ditjenbun, 2019).

Rata-rata produksi selama lima tahun terakhir (2013-2017) sebesar 637 480 kg biji kering dengan produktivitas 488 kg ha<sup>-1</sup> (Tabel 9.2). Rata-rata setiap tahun terjadi peningkatan produktivitas kopi di beberapa kepulauan besar di Indonesia terutama di Pulau Jawa dan Sulawesi. Jika dilihat berdasarkan data yang ditampilkan pada Tabel 9.2 terjadi peningkatan luas lahan tanaman kopi dari tahun ke tahun namun produktivitasnya tidak selalu meningkat pada setiap kenaikan luasan lahan.

Tabel 9.2 Produktivitas lahan yang ditanami kopi di kebun Kalisat Jampit (2013-2017)

Tahun	Luas Lahan (ha)	Produksi Biji Kopi Kering (Kg/ha)	Produktivitas Biji Kopi Kering (Kg/ha)
2013	1.149,56	334.329	291
2014	1.280,15	1.144.561	894
2015	1.344,79	673.939	500
2016	1.373,79	324.247	236
2017	1.373,79	711.323	518
Rata-rata	1.304,42	637.480	488

Badan Pusat Statistik pada (2017) menyatakan bahwa kopi perkebunan di Indonesia saat ini mencakup area seluas sekitar 1,24 juta ha (933 ha perkebunan kopi robusta, 307 ha perkebunan kopi arabika dan 90% dari total perkebunan dibudidayakan oleh petani skala kecil] sehingga produksi kopi (Robusta dan Arabika) di Indonesia mencapai 666.992 ton dan khususnya produksi kopi di Sumatra Barat sebesar 22.771 ton. Produktivitas kopi Indonesia saat ini adalah 0,552 ton/ha dengan total produksi kopi 685.090 ton dengan luas tanaman kopi Indonesia sebesar 1.241.710 ha. Sedangkan produktivitas kopi Vietnam saat ini adalah 2,175 ton/ha dengan total produksi sebesar 1.395.600 ton dengan luas tanaman kopi sebesar 641.700 ha (General Statistic Office of Vietnam, 2015).

Pengaplikasian biochar limbah kelapa muda pada tanah masam yang ditanami kopi menunjukkan peningkatan secara numerik yaitu pada tinggi batang dan jumlah daun bibit kopi yang sudah dirawat selama 3 bulan (12 minggu). Pemberian 50% Sub-bituminus dan 50% biochar bambu dapat berinteraksi dengan baik untuk meningkatkan kesuburan tanah dengan ordo Ultisol dan pertumbuhan tanaman kopi pada fase pembibitan kopi (Prasetyo, 2020).

## DAFTAR PUSTAKA

- Alluri, K. 1986. Screening rice varieties in acid upland soil. Progress in upland Rice Research, Los Banos Philippines. IRRI. pp. 263-270.
- Arsyad, DM., A. Yusuf, Kamsiyono dan Purwantoro. 2001. Evaluasi adaptasi galur-galur kedelai di lahan kering masam. Dalam Arsyad, DM. *et al.* (eds). Kinerja Teknologi untuk Meningkatkan Produktivitas Tanaman Kacang-kacangan dan Umbi-umbian. Puslitbang. Hal. 27-34.
- Aryanto A., Triadiati, Sugiyanta. 2015. Pertumbuhan dan Produksi Padi Sawah dan Gogo dengan Pemberian Pupuk Hayati Berbasis Bakteri Pemacu Tumbuh di Tanah Masam. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 20(3), 229 – 235.
- Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDLP). 2011. Lahan Pertanian Indonesia. BBSDLP. Bogor.
- Barus J. 2012. Pengaruh Aplikasi Pupuk Kandang dan Sistem Tanam Terhadap Hasil Varietas Unggul Padi Gogo Pada Lahan Kering Masam di Lampung. *Jurnal Lahan Suboptimal*, 1(1), 102-106.
- Bian, M., M. Zhua, D. Sunb, and C. Lic. 2013. Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. *Crop Journal* 1:91-104.
- Efendi, R., Y. Musa, M.F. Bdr, M.D. Rahim, M. Azrai, dan M. Pabendon. 2015. Seleksi jagung inbrida dengan marka molekuler dan toleransinya terhadap kekeringan dan nitrogen rendah. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 34(1):43-53.
- Fadiluddin M. 2009. Efektivitas formula pupuk hayati dalam memacu serapan hara, produksi, dan kualitas hasil jagung dan padi gogo di lapang. [*Tesis*]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Hamim, Mubarik NR, Hanarida I, Sumarni N. 2008. Pengaruh pupuk hayati terhadap pola serapan hara, ketahanan penyakit, produksi, dan kualitas hasil beberapa komoditas tanaman pangan dan sayuran unggulan. [*Laporan penelitian KKP3T*]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Haryanti M. 2010. Karakteristik Sorpsi dan Desorpsi Fosfat Pada Oxisol Dengan Pendekatan Kinetik. *Jurnal Solum*, 7(2), 97-109.

- Heryani N. dan Popi Rejekiningrum. 2019. Pengembangan Pertanian Lahan Kering Iklim Kering Melalui Implementasi Panca Kelola Lahan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 13(2), 63-71
- Indrasari A, Syukur A. 2006. Pengaruh pemberian pupuk kandang dan unsur hara mikro terhadap pertumbuhan jagung pada Ultisol yang dikapur. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 6(2), 116-123.
- Iqbal TEA. 2008. Kombinasi pupuk hayati dan sumber nutrisi dalam memacu serapan hara, pertumbuhan serta produktivitas jagung (*Zea mays L.*) dan padi (*Oryza sativa L.*).[*Tesis*]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Kasno, A., Trustinah, dan A.A. Rahmiana. 2013. Seleksi galur kacang tanah adaptif pada lahan kering masam. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 32(1):16-24.
- Kasno A., 2019. Perbaikan Tanah untuk Meningkatkan Efektivitas dan Efisiensi Pemupukan Berimbang dan Produktivitas Lahan Kering Masa (makalah review), *Jurnal Sumberdaya Lahan* 13(1), 27-40.
- Lubis, K., S.H. Sutjahjo, M. Syukur, dan Trikoesoemaningtyas. 2014. Pendugaan parameter genetik dan seleksi karakter morfofisiologi galur jagung introduksi di lingkungan tanah masam. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 33(2): 122-128.
- Nurida N. L. 2015. Pembena Tanah Alternatif untuk Meningkatkan Produktivitas Tanah dan Tanaman Kedelai di Lahan Kering Masam. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 39 (2), 99-108.
- Prasetyo T. B., Herviyanti, Z. Naspendra, M. Solfianti, S. D. Crisna. 2020. Potensi biochar bambu dan sub-bituminus sebagai amandemen tanah mineral masam untuk mendukung pertumbuhan bibit tanaman kopi (*Coffea arabica L.*). Laporan Penelitian skim Riset Universitas Andalas, h. 25.
- Rumbaina, D., N. Amrizal, Widiyantoro, Marwoto, A. Taufiq, H. Kuntastuti, DM. Arsyad dan Heryanto. 2004. Pengembangan kedelai melalui pendekatan Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT) di lahan masam. Lokakarya Pengembangan Kedelai Melalui Pendekatan Pengelolaan Tanaman Terpadu. BPTP Lampung. Hal. 61-72.

- Subowo, Sumantri, G. E., Kencanasari, A., dan Anas, I. 2003. Pengaruh pengolahan tanah, ameliorasi dan inokulasi pheretima hupiensis terhadap pertumbuhan gulma dan kedelai di Ultisols. (Prosiding). Simposium Nasional Pendayagunaan Tanah Masam, Buku II, Bandarlampung, Puslitbangtanak. 29-30 Sept 2003.
- Sudaryono, A. Wijarnako, dan Suyamto, 2011. Efektivitas kombinasi amelioran dan pupuk kandang dalam meningkatkan hasil kedelai pada tanah Ultisol. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 30(1):43-51.
- Suhartina, Purwantoro, N. Nugrahaeni, dan A. Taufik. 2014. Stabilitas hasil galur kedelai toleran cekaman kekeringan. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 33(1):54-60.
- Sulaeman Y, Maswar, Erfandi D. 2017. Pengaruh kombinasi pupuk organik dan anorganik terhadap sifat kimia tanah, dan hasil tanaman jagung di lahan kering masam. *Jurnal Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian*, 20(1), 1-12.
- Taufiq, A., H. Kuntastyuti, Sudaryono, A.G. Manshuri, Suryantini, Tri Wardani dan Cipto P. 2003. Perbaikan dan peningkatan efisiensi teknik produksi kedelai di lahan kering masam. Laporan Teknik Balitkabi Tahun 2003.
- Taufiq, A., H. Kuntastyuti dan A.G. Manshuri. 2004. Pemupukan dan ameliorasi lahan kering masam untuk peningkatan produktivitas kedelai. Lokakarya Pengembangan Kedelai Melalui Pendekatan Pengelolaan Tanaman Terpadu. BPTP Lampung. Hal. 21-40.
- Taufiq A, Manshuri AG. 2005. Pemupukan dan pengapuran pada varietas kedelai toleran lahan masam di Lampung. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 24(3), 147-158.
- Wade, MK., M. Al-Jabri dan M. Sudjadi, 1986. The effect of liming on soybean yield and soil acidity parameters of three Red-Yellow Podsollic soils of West Sumatera. *Pemberitaan Pen. Tanah dan Pupuk* (6):1-8.

## GLOSARIUM

---

- Aerasi** : Proses masuk dan keluarnya udara dari dalam tanah
- Aescgynomene** : Salah satu tumbuhan kacang-kacangan yang merupakan tumbuhan inang Bradyrhizobium
- Aktinobakteri** : Bakteri penghasil antimikroba, agen biokontrol terhadap cendawan patogen, penghasil enzim dan antitumor
- Alkalinitas** : Penyangga (*buffer*) perubahan pH air dan indikasi kesuburan yang diukur dengan kandungan karbonat
- Azolla pinnata*** : Sejenis paku air yang hidup bebas mengapung secara horizontal di permukaan air tawar
- Bera** : Masa di mana tanah dalam kondisi istirahat, membiarkan tanah tanpa ditanami
- Biodegradasi** : Proses di mana bahan organik diuraikan oleh enzim yang dihasilkan organisme hidup
- Biomassa** : Bahan yang dihasilkan dari tanaman baik secara langsung ataupun tidak langsung serta digunakan sebagai energi atau bahan dalam jumlah yang cukup besar
- Biopolimer** : Material polimer yang berasal dari alam
- Calopogonium mucunoides*** : Tanaman kalopo atau kacang tanah liar, *legume* menjalar, sering dijadikan tanaman penutup tanah
- Coalification*** : Tahap pembatubaraan; gabungan proses biologi, kimia, dan fisika yang terjadi karena pengaruh pembebanan dari sedimen yang menutupinya, temperatur, tekanan dan waktu terhadap komponik organik dari gambut, di mana

	persentase karbon meningkat dan hidrogen dan oksigen akan berkurang
<b>Elevasi</b>	: Posisi ketinggian suatu objek dari satu titik tertentu
<b>Feedstock</b>	: Bahan baku yang digunakan dalam pembuatan biochar
<b>FTIR</b>	: Spektroskopi inframerah yang dilengkapi dengan traformasi fourier yang berfungsi untuk mengetahui spektrum gugus fungsi suatu senyawa
<b>Hemiselulosa</b>	: Polisakarida kompleks dan bercabang, yang disusun oleh D-glukosa, D-manosa, D-galatosia, D-silosa, L-Arabinosa yang dihubungkan oleh ikatan glikosidik ( $\beta$ -1 $\rightarrow$ 4) yang menghubungkan unit pirosil. Komponen ini memiliki struktur yang amorf dan mudah terhidrolisis
<b>Heterosiklik</b>	: Senyawa kimia yang memiliki struktur cincin (siklik) dengan senyawa atom selain atom karbon, yaitu O, S, N
<b>Hidrolisis</b>	: Proses di mana air digunakan untuk memutuskan ikatan pada suatu molekul
<b>Karbon Stabil</b> ( <i>Fixed Carbon</i> )	: Bahan yang tertinggal setelah pirolisis yang terdiri dari karbon aromatik yang menyatu dan sedikit H, O, S, dan N yang tidak terbawa gas
<b>Konsentrat</b>	: Pakan yang memiliki kandungan serat kasar rendah
<b>Legum</b>	: Tanaman jenis hijauan yang bijinya berkeping dua, memiliki bintil-bintil akar, dan mengandung protein kasar yang tinggi
<b>Ligan</b>	: Molekul sederhana yang bertindak sebagai donor pasangan elektron pada senyawa kompleks
<b>Lignin</b>	: Komponen kimia kompleks yang mengandung unit <i>phenyl-phropane</i> bercabang dengan derajat polimer yang tinggi

- Lignoselulosa** : Gabungan dari 3 polisakarida yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin yang membentuk suatu ikatan kimia kompleks; bahan dasar dinding sel tumbuhan
- Mikroorganisme termofilik** : Mikroorganisme yang dapat tumbuh pada suhu tinggi (45-70 °C)
- Nitrogen Pyridinic** : Senyawa organik heterosiklik dasar secara struktural terkait dengan benzena dengan satu gugus metin yaitu =CH-, digantikan oleh atom nitrogen
- Nitrogen Pyrrolic** : Atom nitrogen terminasi hidrogen yang tergabung dalam cincin pentagonal dan menyumbang dua elektron p ke sistem  $\pi$
- Peatification** : Tahap penggabungan; tahap di mana sisa-sisa tumbuhan yang terakumulasi tersimpan dalam kondisi bebas oksigen (anaerobik) di daerah rawa dengan sistem pengeringan yang buruk dan selalu tergenang air pada kedalaman 0.5-10 meter. Material tumbuhan yang busuk ini melepaskan unsur H, N, O, dan C dalam bentuk senyawa CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan NH<sub>3</sub> untuk menjadi humus. Selanjutnya oleh bakteri anaerobik dan fungi diubah menjadi gambut.
- Pirolisis** : Dekomposisi termokimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen atau perreaksi kimia lainnya, di mana material mentah akan mengalami pemecahan struktur kimia menjadi fase gas
- Residu** : Bagian yang tersisa dari suatu senyawa setelah proses atau reaksi kimia selesai dilakukan
- Rotasi Tanaman** : Salah satu sistem budidaya tanaman dengan cara menggilir atau menanam lebih dari satu jenis tanaman yang berbeda dalam waktu yang tidak bersamaan

- Scanning Elektro Magnetik (SEM)** : Peralatan untuk menguji/melihat struktur morfologi permukaan sampel
- Senyawa kompleks logam organik** : Senyawa kompleks yang mengandung logam dan ligan organik
- Tanaman penutup tanah** : Tumbuhan atau tanaman yang khusus ditanam untuk melindungi tanah dari ancaman kerusakan oleh erosi dan/atau memperbaiki sifat kimia dan sifat fisik tanah
- Tanpa olah tanah** : Cara penanaman tanpa melakukan persiapan lahan seperti pembalikan dan penggemburan
- X-Ray Diffraction (XRD)** : Teknik analisis cepat nondestruktif yang terutama digunakan untuk identifikasi fase bahan kristal dan dapat memberikan informasi tentang dimensi unit sel
- YR** : *Yellow* (Y), *Red* (R)

Potensi tanah mineral masam yang sangat luas di Indonesia merupakan kawasan geokologi yang harus lebih produktif dari masa ke masa. Namun, tidak dapat dimungkiri dibalik potensinya tersimpan kendala bahwa tanah ini memiliki tingkat kesuburan yang rendah. Tanah ini juga mudah terdegradasi dan proses restorasinya memerlukan waktu yang panjang, sehingga pengelolaannya harus melalui strategi dan teknologi yang diperlukan dalam meningkatkan produktivitasnya. Konsepsi pengembangan teknologi tepat guna melalui teknologi ameliorasi terus dikembangkan terhadap pertanian dalam mencapai tujuan untuk menjadikannya wilayah produktivitas tinggi, tanpa adanya gangguan dari tingkat kestabilannya. Sehingga, terciptanya wilayah produktif yang berkelanjutan. Oleh Karena itu, buku ***Teknologi Ameliorasi Tanah Mineral Masam secara Berkelanjutan*** ini membahas berbagai pendekatan konsep kunci mengenai potensi, proses dan karakteristik serta kendala yang terjadi pada tanah mineral masam. Penulis juga menyajikan perkembangan teknologi ameliorasi terbaru yang mencakup pemilihan dan potensi bahan organik dan anorganik yang dapat membantu petani menjaga keseimbangan lingkungan sembari meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman. Teknologi ini mengoptimalkan potensi dan pemanfaatan sumber daya lokal serta limbah pertanian dan perkebunan secara berkelanjutan.

Teori dan aplikasi yang dikembangkan dalam buku ini dapat menjadi sumber informasi bagi siapa pun yang tertarik untuk memahami dan mengatasi problematika tanah mineral masam dengan penerapan teknologi ameliorasi yang tepat untuk dapat menciptakan pertanian yang lebih ramah lingkungan dan meningkatkan produktivitas lahan pertanian secara berkelanjutan.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)

Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581

Telp/Fax : (0274) 4533427

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

✉ cs@deepublish.co.id

📍 Penerbit Deepublish

📧 @penerbitbuku\_deepublish

🌐 www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Pertanian

ISBN 978-623-02-7563-0



9

786230

275630