



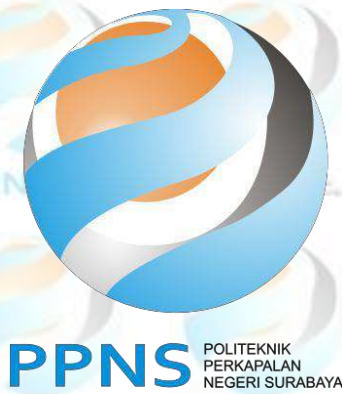
TUGAS AKHIR (WT 43250)

**STUDI KOMPARASI KARAKTERISTIK *BIOCHAR* TUNGGAL
DAN KOMPOSIT SERTA PENGARUHNYA TERHADAP SIFAT
HIDROLIS DAN REMEDIASI LOGAM BERAT (Pb) PADA TANAH**

Deul Tirtayuda Legawa
NRP. 1022040037

DOSEN PEMBIMBING:
VIVIN SETIANI, S.T., M.Eng.
RIA RISMAWATI, S.Si., M.Si.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN
LIMBAH JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



TUGAS AKHIR (WT 43250)

**STUDI KOMPARASI KARAKTERISTIK *BIOCHAR* TUNGKAL
DAN KOMPOSIT SERTA PENGARUHNYA TERHADAP
SIFAT HIDROLIS DAN REMEDIASI LOGAM BERAT (Pb)
PADA TANAH**

**Deul Tirtayuda Legawa
NRP. 1022040037**

**DOSEN PEMBIMBING:
VIVIN SETIANI, S.T., M.Eng.
RIA RISMAWATI, S.Si., M.Si**

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA**

2026

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

STUDI KOMPARASI KARAKTERISTIK *BIOCHAR* TUNGGAL DAN KOMPOSIT SERTA PENGARUHNYA TERHADAP SIFAT HIDROLIS DAN REMEDIASI LOGAM BERAT (Pb) PADA TANAH

Disusun Oleh:

Deul Tirtayuda Legawa

1022040037

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah
Jurusan Teknik Permesinan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 7 Juli 2026

Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

1. Vivin Setiani, S.T., M.Eng.

(7248767668230273)

(.....)

2. Ria Rismawati, S.Si., M.Si.

(1933776677230192)

(.....)

3. Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T.

(8449768669230313)

(.....)

4. Nur Fajar Aprilia S., S.T., M.T.

(1757775676230202)

(.....)

Dosen Pembimbing

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

1. Vivin Setiani, S.T., M.Eng.

(7248767668230273)

(.....)

2. Ria Rismawati, S.Si., M.Si.

(1933776677230192)

(.....)

Menyetujui

Ketua Jurusan,



Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T.

NIP. 1977081922005011001

Mengetahui

Koordinator Program Studi,

Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T.

NIP. 197804142005012002

Halaman ini sengaja dikosongkan



PPNS

PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021
Date : 3 Nopember 2015
Rev. : 01
Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Deul Tirtayuda Legawa

NRP. : 1022040037

Jurusan/Prodi : Teknik Permesinan Kapal / D4 Teknik Pengolahan Limbah

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

Studi Komparasi Karakteristik *Biochar* Tunggal dan Komposit serta Pengaruhnya Terhadap Sifat Hidrolis dan Remediasi Logam Berat (Pb) pada Tanah.

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 20 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,

(Deul Tirtayuda Legawa)
NRP.1022040037

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, karunia, kesehatan, kekuatan, kesabaran, serta kemudahan yang diberikan kepada penulis sehingga penelitian berjudul "Studi Komparasi Karakteristik *Biochar* Tunggal dan Komposit serta Pengaruhnya terhadap Sifat Hidrolis dan Remediasi Logam Berat (Pb) pada Tanah" dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Program Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Proses penyusunan penelitian ini diwarnai berbagai tantangan dan pembelajaran yang membentuk ketekunan serta semangat penulis untuk terus berkembang. Penulis menyadari bahwa keberhasilan penyelesaian penelitian ini tidak terlepas dari doa, dukungan, bantuan, bimbingan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada kedua orang tua penulis, Bapak Sandi dan Almarhumah Ibu Poniyah, yang telah menjadi sumber kekuatan, kasih sayang, dan ketulusan dalam setiap langkah kehidupan penulis. Tiada kata yang mampu sepenuhnya menggambarkan besarnya doa, pengorbanan, serta cinta yang telah diberikan hingga penulis mampu menempuh dan menyelesaikan pendidikan ini. Khusus untuk Almarhumah Ibu Poniyah, meskipun raga telah tiada, kasih, didikan, dan nilai-nilai kehidupan yang ditanamkan senantiasa hidup dalam setiap langkah dan menjadi pengingat bagi penulis untuk terus berjuang, bertahan, dan menyelesaikan amanah pendidikan ini dengan sebaik-baiknya. Semoga pencapaian ini menjadi salah satu bentuk bakti dan rasa syukur yang dapat penulis persembahkan.
2. Kepada kakak tercinta, Dian Resti Perdania, terima kasih atas segala perhatian, dukungan, motivasi, dan kepercayaan yang tidak pernah berhenti diberikan kepada penulis. Kehadiranmu telah menjadi tempat untuk kembali menguatkan langkah ketika menghadapi berbagai tantangan selama

proses perkuliahan. Terima kasih karena selalu mengingatkan bahwa setiap perjuangan akan menemukan akhirnya, serta setiap usaha yang dijalani dengan sungguh-sungguh akan membawa penulis semakin dekat kepada harapan dan cita-cita yang ingin diwujudkan

3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T., selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Ibu Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T., selaku Koordinator Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah yang telah memberikan arahan, dukungan, serta kesempatan kepada penulis dalam pelaksanaan penelitian hingga dapat terselesaikan dengan baik.
6. Ibu Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah yang telah memberikan arahan, semangat, dan motivasi selmaa pelaksanaan tugas akahir 2026.
7. Ibu Vivin Setiani, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing I yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, serta dukungan kepada penulis sejak awal penelitian hingga penyusunan laporan ini selesai.
8. Ibu Ria Rismawati, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi sealama pelaksanaan tugas akhir.
9. Ibu Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I yang yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, bantuan, masukan serta motivasi sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.
10. Ibu Nur Fajar Aprilia Sari, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji II yang yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, bantuan, masukan serta motivasi sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.
11. Seluruh keluarga IGNECENT 22 yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan perkuliahan penulis, menghadirkan kebersamaan, dukungan, serta berbagai pengalaman berharga yang akan selalu dikenang sebagai cerita indah selama menempuh perkuliahan.

12. Kepada kakak tingkat angkatan 2020 dan 2021, serta adik tingkat angkatan 2023 dan 2024, terima kasih atas bantuan, kebersamaan, dan cerita yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama perkuliahan. Terima kasih kepada kakak tingkat yang telah berbagi ilmu, pengalaman, dan arahan, serta kepada adik tingkat yang telah menemani dan memberi warna dalam perjalanan penulis hingga akhir. Semoga setelah ini kita semua berani mengambil langkah masing-masing, mengejar apa yang kita impikan, dan menemukan kesuksesan di jalan yang telah kita pilih. Semoga segala kebaikan dan kebersamaan yang pernah terjalin menjadi kenangan yang selalu kita ingat.
13. Kepada Jamaah Al Hilal, terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama menyelesaikan tugas akhir. Hilal bukan hanya tempat untuk menikmati secangkir kopi, tetapi juga menjadi tempat berbagi cerita, bertukar pikiran, saling menyemangati, bahkan sama-sama berjuang hingga larut malam demi menyelesaikan tugas akhir. Terima kasih atas kebersamaan, tawa, dukungan, dan semangat yang membuat proses yang berat terasa lebih ringan. Semoga setelah lulus nanti, kita semua diberikan keberanian untuk melangkah mengejar impian masing-masing, tidak takut mencoba hal-hal baru, dan selalu diberi kemudahan dalam setiap jalan yang dipilih. Semoga kesuksesan menyertai setiap langkah kita, dan semoga kebersamaan yang pernah terjalin di Al Hilal tetap menjadi cerita baik yang akan selalu dikenang.
14. Terima kasih kepada teman-teman TEGUH asal Banyuwangi, Kesa, Reza, dan Bio, yang telah menjadi bagian dari perjalanan ini. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, canda tawa, serta semangat yang selalu diberikan selama masa perkuliahan. Banyak kenangan, pengalaman, dan pelajaran berharga yang telah kita lalui bersama. Kehadiran kalian tidak hanya menjadi teman seperjuangan dalam menyelesaikan berbagai tantangan akademik, tetapi juga menjadi sahabat yang membuat perjalanan ini terasa lebih berwarna dan bermakna.
15. Ucapan terima kasih yang tulus saya sampaikan kepada Balqist Iqfirlana Khayumi, yang telah menjadi partner selama OJT dan penyusunan Tugas

Akhir ini, serta senantiasa hadir memberikan dukungan, semangat, dan motivasi di tengah berbagai tantangan dan kesibukan yang dihadapi. Terima kasih atas kesabaran, pengertian, dan kebersamaan yang telah menjadikan banyak proses terasa lebih ringan untuk dijalani. Semoga segala usaha, perjuangan, dan doa yang telah diupayakan membuahkan hasil terbaik, serta semoga kebersamaan yang telah terjalin dapat terus menjadi sumber kekuatan dan kebahagiaan di masa yang akan datang.s

16. Kepada diri penulis sendiri, terima kasih karena telah memilih untuk tetap bertahan di setiap fase yang tidak mudah, tetap melangkah di tengah keraguan, serta tidak menyerah meskipun harus menghadapi berbagai tantangan, kegagalan, kehilangan, dan tekanan selama perjalanan perkuliahan. Proses ini mengajarkan bahwa keberhasilan bukan hanya tentang mencapai tujuan, tetapi juga tentang keberanian untuk bangkit setiap kali terjatuh dan kesediaan untuk terus belajar dari setiap pengalaman. Tugas akhir ini bukan sekadar syarat memperoleh gelar sarjana terapan, melainkan bukti bahwa ketekunan, kesabaran, dan keyakinan mampu mengantarkan penulis melewati setiap rintangan hingga mencapai titik ini. Terima kasih karena telah mempercayai proses, menjaga harapan ketika keadaan terasa sulit, dan tidak berhenti berusaha hingga setiap langkah yang dahulu terasa berat akhirnya menjadi bagian dari perjalanan yang patut disyukuri. Semoga pencapaian ini menjadi awal untuk melangkah lebih jauh dengan hati yang lebih kuat, bijaksana, dan penuh makna.

Surabaya, 7 Juli 2026

Deul Tirtayuda Legawa

STUDI KOMPARASI KARAKTERISTIK *BIOCHAR* TUNGGAL DAN KOMPOSIT SERTA PENGARUHNYA TERHADAP SIFAT HIDROLIS DAN REMEDIASI LOGAM BERAT (Pb) PADA TANAH

Deul Tirtayuda Legawa

ABSTRAK

Pencemaran tanah oleh timbal (Pb) memerlukan teknologi remediasi yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik fisik dan kimia *sludge* dan *bagasse*, mengevaluasi pengaruh variasi bahan baku dan suhu *pyrolysis* terhadap karakteristik *biochar*, menilai pengaruh aplikasi *biochar* terhadap sifat tanah tercemar, serta mengkaji perannya dalam remediasi Pb. *Biochar* diproduksi dari *sludge*, *bagasse*, *post-mixing*, dan *co-pyrolysis (pre-mixing)* pada suhu 350 °C dan 500 °C. Karakterisasi meliputi analisis proksimat, pH, *electrical conductivity*, gugus fungsi, dan morfologi permukaan, sedangkan pengaruh perlakuan dianalisis menggunakan *Multivariate Analysis of Variance*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *sludge* memiliki kandungan mineral lebih tinggi, sedangkan *bagasse* memiliki kandungan karbon lebih tinggi. Peningkatan suhu *pyrolysis* dari 350 °C menjadi 500 °C meningkatkan kadar abu, *fixed carbon*, pH, dan *electrical conductivity* serta menurunkan *volatile matter*. Suhu *pyrolysis* dan jenis bahan baku berpengaruh signifikan terhadap karakteristik *biochar* ($p < 0,05$). *Biochar co-pyrolysis* suhu 500 °C memperoleh skor kualitas tertinggi sebesar 4,31. Aplikasi *biochar* menurunkan *bulk density* 19,68% dan *particle density* 6,40%, serta meningkatkan porositas 28,10%, pH 10,96%, dan *electrical conductivity* 59,37%. Konsentrasi Pb tersedia menurun dari 80,35 mg/L menjadi 17,47 mg/L dengan efisiensi penyisihan 82,53%. *Biochar co-pyrolysis sludge-bagasse* berpotensi digunakan sebagai remediasi tanah untuk memperbaiki kualitas tanah dan mengurangi ketersediaan Pb.

Kata kunci: *biochar*, *co-pyrolysis*, lumpur limbah, *bagasse*, timbal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

A COMPARATIVE STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF SINGLE AND COMPOSITE BIOCHAR AND THEIR EFFECTS ON HYDRAULIC PROPERTIES AND HEAVY METAL (Pb) REMEDIATION IN SOIL

Deul Tirtayuda Legawa

ABSTRACT

Lead (Pb) contamination in soil requires effective and sustainable remediation strategies. This study investigated the physicochemical characteristics of sludge and bagasse, evaluated the effects of feedstock composition and pyrolysis temperature on biochar properties, examined the influence of biochar on contaminated soil, and assessed its effectiveness in Pb remediation. Biochar was produced from sludge, bagasse, post-mixed feedstocks, and co-pyrolyzed feedstocks at 350 and 500 °C. Characterization included proximate analysis, pH, electrical conductivity, functional groups, and surface morphology. Treatment effects were analyzed using multivariate analysis of variance. Sludge exhibited higher mineral content, whereas bagasse showed higher carbon content. Increasing the pyrolysis temperature increased ash content, fixed carbon, pH, and electrical conductivity while reducing volatile matter. Feedstock type and pyrolysis temperature significantly influenced biochar characteristics ($p < 0.05$). Co-pyrolysis biochar produced at 500 °C achieved the highest quality score (4.31). Biochar application reduced bulk and particle density while increasing porosity, pH, and electrical conductivity. Available Pb decreased from 80.35 to 17.47 mg/L, representing an 82.53% removal efficiency. Overall, co-pyrolysis biochar effectively improved soil quality and reduced Pb availability.

Keywords: *biochar, co-pyrolysis, sewage sludge, sugarcane bagasse, lead.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat Tugas Akhir	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Karakteristik Material Biomassa.....	7
2.1.1 Lumpur Limbah (<i>Sludge</i>) Industri Pengolahan Kedelai	7
2.1.1.1 Komposisi Fisiokimia dan Kandungan Hara.....	7
2.1.1.2 Potensi dan Tantangan Pemanfaatan <i>Sludge</i>	9
2.1.2 Ampas Tebu (<i>Bagasse</i>).....	11
2.1.2.1 Lignoselulosa dan Pembentukan Kerangka Karbon	12
2.2 Teknologi <i>Pyrolysis</i> dan <i>Biochar</i>	18
2.2.1 Prinsip Dasar dan Mekanisme <i>Pyrolysis</i>	18
2.2.2 Pengaruh Suhu terhadap Karakteristik <i>Biochar</i>	19
2.2.2.1 Sifat Fisik (Randemen dan Morfologi).....	20
2.2.2.2 Sifat Kimia (Stabilitas Karbon dan Gugus Fungsi).....	21
2.2.3 Strategi <i>Co-pyrolysis</i> dan Sinergitas Material.....	23
2.2.4 Seleksi dan Skoring <i>Biochar</i>	25
2.3 Sifat Fisik tanah dan Hidrologi	27
2.3.1 Hubungan Densitas Tanah dan Porositas.....	28
2.3.2 Dinamika Infiltrasi Air dalam Tanah	30
2.3.3 Pengaruh Remediasi <i>Biochar</i> terhadap Struktur Tanah.....	31

2.4	Logam Berat dalam Tanah dan Remediasi.....	32
2.4.1	Karakteristik dan Mobilitas Timbal (Pb).....	33
2.4.2	Mekanisme Remediasi Logam oleh <i>Biochar</i>	35
2.4.2.1	Adsorpsi Fisik dan Pertukaran Ion	36
2.4.2.2	Presipitasi Kimiawi dan Imobilisasi Timbal (Pb).....	37
2.5	Parameter Penelitian	39
2.5.1	Karakteristik Fisikokimia <i>Biochar</i>	39
2.5.2	Derajat Keasaman (pH) Tanah	40
2.5.3	Berat Isi (<i>Bulk density</i>) dan Porositas Total Tanah	40
2.5.4	Keberadaan Hayati Fraksi Timbal (Pb).....	42
2.5.5	Korelasi Karakteristik <i>Biochar</i> terhadap Remediasi Pb	43
2.5.5.1	Karakteristik Gugus Fungsi <i>Biochar</i>	43
2.5.5.2	Karakteristik Permukaan dan Sebaran Mineral <i>Biochar</i>	44
2.6	Analisis Data Statistik	45
2.6.2	Analisis Perubahan Sifat Tanah dan Penurunan Pb.....	46
2.7	Penelitian Terdahulu.....	47
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		50
3.1	Kerangka Penelitian.....	50
3.2	Identifikasi Masalah	52
3.3	Penentuan Rumusan Masalah.....	53
3.4	Studi Literatur.....	53
3.5	Ruang Lingkup	54
3.5.1	Waktu Penelitian.....	54
3.5.2	Tempat Penelitian	54
3.6	Pengumpulan Data.....	55
3.6.1	Data Primer.....	55
3.6.2	Data Sekunder.....	57
3.7	Variabel Penelitian	57
3.7.1	Variabel Bebas.....	57
3.7.2	Variabel Terikat.....	59
3.7.3	Variabel Kontrol.....	60
3.8	Objek Penelitian	60
3.9	Pelaksanaan Penelitian <i>Biochar</i>	61

3.9.1	Persiapan Alat dan Bahan	61
3.9.2	Prosedur Penelitian.....	63
3.10	Analisis Data dan Pembahasan	84
3.10.1	Analisis Data Karakteristik <i>Biochar</i>	84
3.10.2	Analisis Data Sifat Fisik Tanah.....	85
3.10.3	Analisis Data Efektivitas Remediasi Logam Timbal (Pb)	86
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		87
4.1	Karakteristik Awal Material.....	87
4.1.1	Karakteristik Awal Tanah	87
4.1.2	Karakteristik Bahan Baku <i>Biochar</i>	89
4.1.2.1	Kadar Air dan Ukuran Partikel	89
4.1.2.2	Analisis Proximate Bahan Baku.....	90
4.1.2.3	Karakteristik Kimia Bahan Baku	91
4.2	Karakteristik <i>Biochar</i>	91
4.2.1	Randemen (<i>yield</i>) <i>Biochar</i>	91
4.2.2	Analisis Proximat <i>Biochar</i>	94
4.2.2.1	Kadar Air.....	94
4.2.2.2	Kadar Abu (<i>Ash Content</i>).....	95
4.2.2.3	Kadar Zat Terbang (<i>Volatile matter</i>).....	97
4.2.2.4	Kadar Karbon Tetap (<i>Fixed carbon</i>).....	99
4.2.2.5	Derajat Keasaman (pH).....	101
4.2.2.6	<i>Electrical Conductivity</i> (EC).....	103
4.2.3	Analisis Statistik Karakteristik <i>Biochar</i>	104
4.2.3.1	Uji Normalitas Data <i>Biochar</i>	105
4.2.3.2	Uji Homogenitas Varians <i>Biochar</i>	108
4.2.3.3	Uji Multivariate Analysis of Variance (MANOVA)	110
4.2.3.4	Pengaruh Variabel terhadap Karakteristik <i>Biochar</i>	113
4.3	Seleksi <i>Biochar</i> Melalui Pendekatan Skoring Multikriteria	115
4.4	Pengaruh <i>Biochar</i> terhadap Sifat Fisik Tanah Tercemar	119
4.4.1	Perubahan <i>Bulk Density</i> Tanah	120
4.4.2	Perubahan <i>Particle Density</i> Tanah.....	121
4.4.3	Perubahan Porositas Total pada Tanah	122
4.4.4	Perubahan pH Pada Tanah	123

4.4.5	Perubahan EC Pada Tanah	124
4.5	Efektifitas Remediasi Logam Berat Timbal (Pb)	126
4.5.1	Penurunan Mobilitas dan Konsentrasi Pb.....	126
4.5.2	Mekanisme Imobilisasi Berdasarkan Karakteristik <i>Biochar</i>	129
4.5.2.1	Analisis Gugus Fungsi Permukaan (FTIR)	129
4.5.2.2	Analisis Morfologi dan Komposisi Unsur (SEM-EDX)	132
4.5.2.3	Estimasi Luas Area Pori Berbasis Citra (ImgeJ)	136
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		139
5.1	Kesimpulan.....	139
5.2	Saran	140
DAFTAR PUSTAKA		141
LAMPIRAN A		153
LAMPIRAN B.....		159
LAMPIRAN C		163
LAMPIRAN D		173
LAMPIRAN F.....		181
LAMPIRAN G		189
LAMPIRAN H		195
LAMPIRAN I.....		203
BIOGRAFI PENULIS.....		211

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Fisikokimia dan Kandungan Hara Lumpur Limbah Industri.....	8
Tabel 2. 2 Analisis Proksimat dan Ultimat Bahan Baku <i>Bagasse</i> (Bagasse).....	12
Tabel 2. 3 Perubahan Karakteristik Kimia <i>Biochar</i> Akibat Peningkatan Suhu	22
Tabel 2. 4 Dampak Aplikasi <i>Biochar</i> terhadap Parameter Fisik Tanah.....	29
Tabel 2. 5 Perbandingan Karakteristik Geokimia Timbal (Pb).....	34
Tabel 2. 6 Perbandingan Penelitian Terdahulu	48
Tabel 3. 1 Rancangan Produksi dan Kode Sampel <i>Biochar</i>	58
Tabel 3. 2 Rancangan Perlakuan dan Kode Sampel Remediasi	58
Tabel 3. 3 Klasifikasi Parameter Skoring <i>Biochar</i>	68
Tabel 3. 4 Bobot Parameter dalam Metode Skoring <i>Biochar</i>	69
Tabel 4. 1 Karakterisasi Awal Tanah topsoil	87
Tabel 4. 2 Karakteristik Fisikokimia Bahan Baku <i>Biochar</i>	89
Tabel 4. 3 Uji Normalitas Variabel Terikat berdasarkan <i>Biochar</i>	105
Tabel 4. 4 Analisis Skewness dan Kurtosis Karakteristik <i>Biochar</i>	106
Tabel 4. 5 Hasil Uji Homogenitas Metode Levene.....	109
Tabel 4. 6 Hasil Uji Signifikansi Multivariat (Multivariate Tests).....	111
Tabel 4. 7 Hasil Uji Signifikansi Individual	112
Tabel 4. 8 Klasifikasi Bobot Multi-Kriteria Seleksi <i>Biochar</i>	116
Tabel 4. 9 Nilai Maksimum dan Minimum Parameter Seleksi.....	117
Tabel 4. 10 Matriks Evaluasi dan Pemilihan Kandidat Remediasi.....	117
Tabel 4. 11 Rentang Bilangan Gelombang dan Gugus Fungsi FTIR pada <i>Biochar</i>	129
Tabel 4. 12 Karakteristik Struktur Pori <i>Biochar</i> Berdasarkan Analisis Citra Menggunakan ImageJ	136

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Fenomena ash clogging pada <i>biochar</i> berbasis lumpur murni.....	11
Gambar 2. 2 Skema degradasi termal lignoselulosa	14
Gambar 2. 3 Spektrum FTIR <i>biochar bagasse</i>	15
Gambar 2. 4 Citra SEM <i>biochar bagasse</i>	17
Gambar 2. 5 Skematik proses pyrolysis.....	19
Gambar 2. 6 Tren penurunan rendemen padatan <i>biochar</i>	20
Gambar 2. 7 Ilustrasi perbedaan morfologi permukaan <i>biochar</i>	21
Gambar 2. 8 Diagram Van Krevelen evolusi kimia biomassa menjadi <i>biochar</i> ...	23
Gambar 2. 9 Pola difraksi sinar-X (XRD) dari berbagai feedstock <i>biochar</i>	25
Gambar 2. 10 Pergeseran kurva retensi air (SWRC) akibat <i>biochar</i>	31
Gambar 4. 1 Grafik Yield <i>Biochar</i>	92
Gambar 4. 2 Grafik Kadar Air <i>Biochar</i>	94
Gambar 4. 3 Grafik Kadar Abu <i>Biochar</i>	96
Gambar 4. 4 Grafik <i>Volatile matter Biochar</i>	98
Gambar 4. 5 Grafik Kadar Karbon Tetap <i>Biochar</i>	100
Gambar 4. 6 Grafik pH <i>Biochar</i>	102
Gambar 4. 7 Grafik EC <i>Biochar</i>	103

Halaman sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan sektor agroindustri di Indonesia memberikan kontribusi penting terhadap perekonomian nasional, namun di sisi lain menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar (Kuncara dkk., 2024). Dua jenis limbah yang banyak dihasilkan adalah lumpur biologis (*sewage sludge*) dari instalasi pengolahan air limbah industri pangan dan *bagasse* (*bagasse*) dari industri gula maupun usaha pengolahan minuman tebu. Apabila tidak dikelola dengan baik, kedua limbah tersebut berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan melalui pencemaran tanah dan air serta membutuhkan lahan penimbunan yang semakin besar (Tarelho dkk., 2019).

Pengelolaan limbah secara konvensional, seperti penimbunan dan pembuangan langsung ke lahan, masih memiliki berbagai keterbatasan (Manea & Bumbac, 2024). Lumpur biologis dapat mengandung senyawa organik yang belum terdegradasi sempurna serta unsur anorganik yang berpotensi terakumulasi di lingkungan. Sementara itu, *bagasse* memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi sehingga sulit terdegradasi secara alami dalam waktu singkat (Zafeer dkk., 2024). Kondisi tersebut mendorong perlunya teknologi pengolahan yang tidak hanya mampu mengurangi volume limbah, tetapi juga menghasilkan produk yang bernilai guna lebih tinggi.

Salah satu teknologi yang berkembang adalah *pyrolysis*, yaitu proses dekomposisi termal biomassa pada kondisi minim oksigen untuk menghasilkan *biochar*. Proses ini mampu menurunkan volume limbah secara signifikan sekaligus menghasilkan material karbon yang relatif stabil (Cao dkk., 2024). Karakteristik *biochar* sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan suhu *pyrolysis*. Peningkatan suhu umumnya menghasilkan *biochar* dengan kandungan *volatile matter* yang lebih rendah, kandungan *fixed carbon* yang lebih tinggi, serta sifat kimia yang lebih stabil (Hassan dkk., 2020; Pelleri dkk., 2021).

Biochar berbasis lumpur biologis dan *biochar* berbasis biomassa lignoselulosa memiliki karakteristik yang berbeda. *Biochar* lumpur biologis

umumnya kaya akan mineral dan memiliki sifat alkalis, sedangkan *biochar* berbasis *bagasse* cenderung memiliki struktur pori yang lebih berkembang dan kandungan karbon yang lebih tinggi (Hadey dkk., 2022). Perbedaan karakteristik tersebut membuka peluang untuk mengombinasikan kedua bahan melalui proses *co-pyrolysis* sehingga diperoleh *biochar* komposit dengan sifat fisik dan kimia yang saling melengkapi (X. Chen dkk., 2022; Mohamed dkk., 2023).

Selain permasalahan limbah, degradasi kualitas tanah (*topsoil*) juga menjadi isu penting dalam pengelolaan lingkungan (B. Wei dkk., 2023). Aktivitas budidaya intensif dan akumulasi bahan pencemar dapat menyebabkan pemadatan tanah yang ditandai oleh peningkatan *bulk density* dan penurunan porositas. Kondisi tersebut menghambat pergerakan air dan udara di dalam tanah serta menurunkan kualitas lingkungan perakaran. Menurut penelitian Wu dkk. (2022) dan Moradi-choghamarani dkk. (2024), aplikasi *biochar* mampu memperbaiki struktur tanah melalui penurunan *bulk density* dan peningkatan porositas sehingga fungsi hidrologis tanah dapat dipulihkan.

Di samping degradasi fisik, tanah juga rentan mengalami pencemaran logam berat, salah satunya timbal (Pb). Logam berat ini bersifat persisten, sulit terdegradasi secara alami, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan (Kumar & Bhattacharya, 2021). Keberadaan Pb di dalam tanah berpotensi menurunkan kualitas lingkungan serta meningkatkan risiko terhadap kesehatan manusia. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengurangi mobilitas Pb adalah penggunaan *biochar* sebagai remediasi tanah. Menurut Oksanen dkk. (2023) dan Imran dkk. (2025), *biochar* dapat menurunkan ketersediaan hayati Pb melalui mekanisme adsorpsi, pertukaran ion, kompleksasi gugus fungsi permukaan, dan pembentukan senyawa mineral yang lebih stabil.

Menurut J. Zhang dkk. (2020), aplikasi *biochar* lumpur biologis maupun *biochar* biomassa terbukti efektif dalam upaya remediasi logam berat. Namun, mayoritas studi masih berfokus pada pemanfaatan bahan tunggal dan lebih banyak mengevaluasi karakteristik material dibandingkan performanya setelah diaplikasikan ke tanah. Kajian mengenai *biochar* komposit hasil *co-pyrolysis* lumpur biologis dan *bagasse* yang mengintegrasikan evaluasi karakteristik

biochar, perbaikan sifat fisik tanah, serta remediasi Pb masih relatif terbatas (Biney & Gusiatin, 2024).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi bahan baku dan suhu *pyrolysis/co-pyrolysis* terhadap karakteristik *biochar* serta efektivitasnya dalam memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah tercemar timbal. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif pemanfaatan limbah yang lebih berkelanjutan sekaligus menghasilkan material pembenah tanah yang efektif untuk mendukung upaya remediasi lahan tercemar logam berat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik fisik dan kimia bahan baku *sludge* dan bagasse sebagai bahan dasar pembuatan *biochar* tunggal dan *biochar* komposit?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi, serta suhu *pyrolysis* terhadap karakteristik *biochar* tunggal dan *biochar* komposit?
3. Bagaimana pengaruh penambahan *biochar* tunggal dan *biochar* komposit terhadap perbaikan sifat fisik dan hidrologis tanah tercemar buatan?
4. Bagaimana pengaruh penambahan *biochar* tunggal dan *biochar* komposit terhadap perubahan sifat kimia tanah?
5. Bagaimana karakteristik *biochar* mempengaruhi efektivitas *biochar* tunggal dan *biochar* komposit dalam remediasi logam berat Timbal (Pb) pada tanah tercemar?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis karakteristik fisik dan kimia bahan baku *sludge* WWTP dan bagasse sebagai bahan dasar pembuatan *biochar* tunggal dan *biochar* komposit.

2. Menganalisis pengaruh variasi komposisi bahan baku dan suhu *pyrolysis* terhadap karakteristik *biochar* tunggal dan *biochar* komposit.
3. Mengevaluasi pengaruh penambahan *biochar* tunggal dan *biochar* komposit terhadap perbaikan sifat fisik dan hidrologis tanah tercemar buatan.
4. Menganalisis pengaruh penambahan *biochar* tunggal dan *biochar* komposit terhadap perubahan sifat kimia tanah tercemar buatan.
5. Menganalisis peran karakteristik *biochar* dalam menentukan efektivitas *biochar* tunggal dan *biochar* komposit pada remediasi logam berat Timbal (Pb) di tanah tercemar.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

Manfaat yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Masyarakat
 - a. Menyediakan informasi mengenai teknologi tepat guna untuk memulihkan kualitas tanah pertanian yang terdegradasi atau tercemar logam berat, sehingga dapat meningkatkan keamanan dan produktivitas lahan.
 - b. Meningkatkan kesadaran masyarakat akan pentingnya valorisasi limbah biomassa menjadi material fungsional yang dapat mengurangi pencemaran lingkungan (bau dan lindi) di sekitar kawasan industri
2. Bagi Mahasiswa
 - a. Sarana untuk mengaplikasikan integrasi ilmu teknologi pengolahan limbah dan rekayasa lingkungan dalam merancang solusi nyata berbasis *waste-to-product*.
 - b. Meningkatkan penguasaan teknis (*hardskill*) dalam proses *pyrolysis*, karakterisasi laboratorium, dan evaluasi standar mutu *biochar*, serta kemampuan analisis data terkait fenomena remediasi tanah.
 - c. Memperdalam pemahaman mengenai potensi valorisasi limbah spesifik menjadi *biochar* komposit, sebagai bekal keahlian profesional di bidang lingkungan industri.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini tidak mengkaji proses modifikasi lanjutan dan hanya terbatas pada *biochar* hasil *pyrolysis* dan *co-pyrolysis* tanpa perlakuan pasca-produksi.
2. Lumpur limbah (*sludge*) yang digunakan sebagai bahan baku *biochar* diperoleh dari industri kecap yang berlokasi di Kabupaten Pasuruan, sehingga karakteristik *sludge* yang digunakan bersifat spesifik terhadap sumber tersebut.
3. *Bagasse (bagasse)* yang digunakan sebagai bahan baku *biochar* diperoleh dari UMKM penjual minuman sari tebu di wilayah Surabaya, sehingga karakteristik *bagasse* yang digunakan merepresentasikan kondisi bahan baku dari skala usaha kecil dan menengah.
4. Tanah yang digunakan pada penelitian ini diambil dari tanah lapisan atas (*top soil*) dari lahan pertanian
5. Tanah yang digunakan merupakan tanah lapisan atas (*top soil* pada kedalaman 0-20 cm) yang diambil dari lahan, dengan tekstur tanah dominan berupa Lempung Berliat yang dipersiapkan dengan dikeringkan dan pengayakan lolos saringan 2 mm.
6. Penambahan *biochar* difokuskan pada tanah tercemar buatan dengan logam berat Timbal (Pb), sehingga hasil penelitian belum merepresentasikan kondisi lapangan secara langsung.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Material Biomassa

Pemilihan bahan baku dalam sintesis *biochar* memegang peranan vital karena karakteristik prekursor akan diwariskan secara langsung pada sifat fisikokimia produk akhir. Penelitian ini menggunakan dua jenis limbah dengan karakteristik kontras namun saling melengkapi, yaitu lumpur limbah (*sewage sludge*) yang kaya mineral fosfor dan *bagasse* (*bagasse*) yang kaya struktur karbon lignoselulosa.

2.1.1 Lumpur Limbah (*Sludge*) Industri Pengolahan Kedelai

2.1.1.1 Komposisi Fisiokimia dan Kandungan Hara

Lumpur limbah (*sewage sludge*) yang dihasilkan dari instalasi pengolahan air limbah (IPAL) industri pangan, khususnya sektor pengolahan kedelai, merupakan material residu dengan karakteristik matriks yang kompleks dan heterogen. Manea & Bumbac (2024) mendeskripsikan *sludge* IPAL industri sebagai material dengan tantangan lingkungan yang signifikan akibat volume, bau, serta kandungan kontaminannya, namun tetap mengandung fraksi bahan organik dan nutrisi makro dalam jumlah besar. Kompleksitas matriks ini menyebabkan lumpur industri pengolahan kedelai tidak dapat dimanfaatkan secara langsung tanpa perlakuan pendahuluan yang tepat.

Secara fisik, lumpur limbah industri pengolahan kedelai umumnya berasal dari unit *dewatering* seperti *belt press* dan masih memiliki kadar air yang sangat tinggi (>80%), sebagaimana dilaporkan oleh Tarelho dkk. (2019). Tingginya kandungan air ini menjadi kendala utama dalam penerapan proses termal secara langsung dan berimplikasi pada kebutuhan energi pengeringan yang besar. Meskipun demikian, fraksi padatan lumpur tersebut menyimpan potensi material yang signifikan. Mohammadi Galangash dkk. (2018) melaporkan bahwa lumpur kering industri pengolahan pangan memiliki kandungan bahan organik sebesar $33,6 \pm 2,85\%$, sedangkan

Mazumder dkk. (2025) mencatat kandungan *volatile organic matter* pada kisaran 30–45%. Tingginya fraksi organik ini menegaskan bahwa *sludge* industri pangan merupakan prekursor yang sesuai untuk dikonversi menjadi material berbasis karbon melalui proses *pyrolysis*.

Data spesifik mengenai karakteristik kimia lumpur ditampilkan pada Tabel 2. 1 berikut :

Tabel 2. 1 Fisikokimia dan Kandungan Hara Lumpur Limbah Industri

Parameter Karakteristik	Unit	Rata-rata	Rentang Referensi	Implikasi pada Penelitian Remediasi
pH (H ₂ O)	-	7,45 ± 0,1	6,5 – 7,8	Netral; aman sebagai bahan dasar tanah.
Bahan Organik	%	33,6 ± 2,85	30 – 45	Menjadi sumber karbon dan energi dalam proses <i>pyrolysis</i> .
Nitrogen Total	%	6,29 ± 0,16	1,75 – 6,5	Mendukung biostimulasi mikroba tanah setelah aplikasi.
Fosfor Total	%	1,41 ± 0,01	1,2 – 3,5	Penting untuk pembentukan mineral stabil Pb–P (<i>Pyromorphite</i>).
Logam Berat (Total)	mg/kg	94,3 ± 59,5	Bervariasi	Perlu stabilisasi termal agar tidak mudah terlindi ke lingkungan.

Berdasarkan data karakteristik yang ditampilkan pada Tabel 2. 1, lumpur industri pengolahan kedelai memiliki nilai pH mendekati netral (7,45 ± 0,1) dan masih berada dalam rentang referensi yang aman bagi lingkungan tanah (Hassan dkk., 2020). Kondisi ini menunjukkan bahwa lumpur relatif tidak reaktif secara asam–basa dan tidak berpotensi menyebabkan perubahan pH tanah secara signifikan apabila digunakan sebagai bahan dasar setelah perlakuan lanjutan.

Kandungan bahan organik sebesar 33,6 ± 2,85% menegaskan bahwa lumpur merupakan material yang kaya karbon, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi dan prekursor pembentukan matriks karbon aromatik yang lebih stabil selama proses *pyrolysis* (Mazumder dkk., 2025; Mohammadi Galangash dkk., 2018). Dari aspek nutrisi, kandungan nitrogen total yang relatif tinggi (6,29 ± 0,16%) menunjukkan potensi *sludge*

dalam mendukung aktivitas biologis tanah. Namun demikian, tingginya nitrogen relatif terhadap karbon mengindikasikan rasio C/N yang rendah, sehingga berisiko memicu mineralisasi cepat dan pelepasan nitrogen dalam bentuk amonia apabila lumpur diaplikasikan tanpa perlakuan pendahuluan (Oksanen dkk., 2023).

Selain nitrogen, keberadaan fosfor total sebesar $1,41 \pm 0,01\%$ menunjukkan bahwa lumpur industri pengolahan kedelai merupakan sumber fosfor yang signifikan. Thanh Phong dkk. (2025) menjelaskan bahwa melalui proses *pyrolysis*, fosfor dalam *sludge* cenderung terkonsentrasi pada fase abu dan berperan penting dalam mekanisme presipitasi logam berat, khususnya timbal (Pb), melalui pembentukan mineral fosfat timbal yang stabil dan sukar larut, seperti piromorfit.

Di sisi lain, total kandungan logam berat sebesar $94,3 \pm 59,5$ mg/kg menunjukkan variabilitas yang cukup besar dan mencerminkan kompleksitas matriks *sludge*. Meskipun konsentrasinya relatif lebih rendah dibandingkan *sludge* industri non-pangan, keberadaan logam berat tetap menimbulkan potensi risiko lingkungan apabila lumpur digunakan secara langsung (S. Chen dkk., 2025). Oleh karena itu, stabilisasi termal melalui proses *pyrolysis* dipandang sebagai pendekatan yang relevan dan diperlukan dalam penelitian ini untuk menurunkan mobilitas logam berat, meningkatkan kestabilan matriks karbon, serta menghasilkan *biochar* yang lebih aman dan efektif untuk aplikasi remediasi tanah tercemar timbal.

2.1.1.2 Potensi dan Tantangan Pemanfaatan *Sludge*

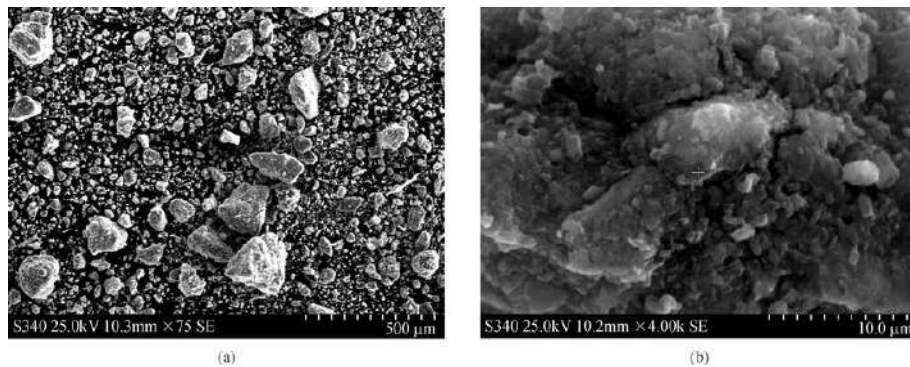
Meskipun memiliki potensi besar sebagai sumber bahan organik dan nutrisi, pemanfaatan lumpur limbah (*sewage sludge*) sebagai material pembenah tanah atau bahan remediasi menghadapi sejumlah tantangan multidimensi yang harus dimitigasi sebelum diaplikasikan ke lingkungan. Tantangan tersebut mencakup aspek biologis, kimia, termokimia, serta keterbatasan struktural material yang secara kolektif membatasi pemanfaatan lumpur secara langsung.

Tantangan utama pertama berkaitan dengan risiko kontaminan biologis dan logam berat. Li dkk. (2025), dalam kajian penilaian risiko

lingkungan, melaporkan bahwa aplikasi langsung lumpur ke tanah (*land application*) sering kali dibatasi oleh keberadaan patogen aktif serta polutan organik persisten yang dapat mengganggu kesehatan tanah dan tanaman. Selain itu, Oksanen dkk. (2023) menunjukkan bahwa lumpur dari sektor industri tertentu cenderung mengakumulasi logam berat seperti Kadmium (Cd), Tembaga (Cu), dan Seng (Zn). Pada beberapa kasus, konsentrasi logam berat tersebut dilaporkan melebihi ambang batas baku mutu (misalnya Cd > 1,5 mg/kg), sehingga pemanfaatan lumpur secara agronomis dibatasi secara ketat oleh regulasi guna mencegah bioakumulasi dan transfer racun ke dalam rantai makanan.

Tantangan berikutnya berkaitan dengan stabilitas termokimia lumpur selama proses konversi. Mazumder dkk. (2025) melaporkan bahwa tingginya kandungan nitrogen organik dalam lumpur mentah berpotensi terlepas sebagai emisi gas reaktif, seperti NH₃ atau NO_x, apabila proses termal tidak dikendalikan dengan baik. Dari sisi kualitas karbon, S. Wei dkk. (2019) menjelaskan bahwa *pyrolysis* pada suhu relatif rendah (< 400 °C) cenderung menghasilkan *biochar* dengan struktur karbon yang masih labil serta kandungan *Dissolved Organic Carbon* (DOC) yang tinggi. Fraksi DOC ini mudah terdegradasi oleh aktivitas mikroba tanah, sehingga menurunkan kestabilan karbon dan membatasi kemampuan *biochar sludge* dalam mendukung sekuestrasi karbon jangka panjang maupun imobilisasi kontaminan.

Selain aspek kimia dan termal, kelemahan struktural akibat kandungan abu yang tinggi juga menjadi hambatan teknis signifikan pada *biochar* berbasis lumpur murni (*mono-sludge biochar*). Cao dkk. (2024) melaporkan bahwa tingginya fraksi mineral anorganik pada lumpur menyebabkan terjadinya fenomena *ash clogging* selama proses pemanasan. Pada kondisi ini, lelehan mineral menutup dan menyumbat pori-pori mikro, sehingga luas permukaan spesifik dan volume pori *biochar* menurun secara drastis. Akibatnya, *biochar* lumpur murni cenderung memiliki struktur yang padat (*dense*), porositas rendah, serta kemampuan adsorpsi fisik yang jauh lebih rendah dibandingkan *biochar* berbasis biomassa lignoselulosa.



Gambar 2. 1 Fenomena *ash clogging* pada *biochar* berbasis lumpur murni

Sumber: (Deng, 2020).

Keterbatasan porositas dan struktur ini menyebabkan *biochar sludge* kurang optimal apabila digunakan secara tunggal sebagai pembenah struktur tanah maupun sebagai media adsorpsi kontaminan anorganik. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan rekayasa material untuk mengatasi kelemahan intrinsik tersebut.

Salah satu pendekatan yang dinilai paling efektif adalah penerapan strategi *co-pyrolysis* dengan biomassa kaya lignoselulosa, seperti *bagasse* (*bagasse*). Hassan dkk. (2020) menunjukkan bahwa pencampuran lumpur dengan biomassa lignoselulosa selama proses *pyrolysis* mampu meningkatkan aromatisitas karbon, memperbaiki perkembangan sistem pori hirarkis, serta menekan fenomena aglomerasi abu. Matriks karbon dari biomassa berfungsi sebagai kerangka struktural yang mencegah penyumbatan pori oleh mineral lumpur, sekaligus membantu distribusi unsur anorganik secara lebih merata. Dengan demikian, *biochar* komposit yang dihasilkan melalui *co-pyrolysis* diharapkan memiliki sifat fisik dan kimia yang lebih unggul dibandingkan material tunggalnya, khususnya untuk aplikasi remediasi tanah tercemar logam berat.

2.1.2 Ampas Tebu (*Bagasse*)

Ampas Tebu (*bagasse*) merupakan residu lignoselulosa berserat yang dihasilkan secara masif dari proses penggilingan dan ekstraksi nira pada industri gula maupun UMKM. Material ini tersedia dalam jumlah besar dan relatif homogen, sehingga banyak dikaji sebagai bahan baku potensial dalam

konversi termokimia(Zafeer dkk., 2024). Berbeda dengan lumpur limbah yang memiliki morfologi amorf, lembek, dan kaya mineral, *bagasse* dicirikan oleh struktur dinding sel yang tersusun rapi, berserat, dan berongga, yang memberikan kestabilan mekanik alami pada material (Lian dkk., 2025).

Dalam konteks produksi *biochar*, karakteristik tersebut menjadi keunggulan utama *bagasse* karena memungkinkan pembentukan kerangka karbon (*carbon scaffold*) yang stabil selama *pyrolysis* (Lian dkk., 2025). Kerangka ini sangat penting ketika *bagasse* dipadukan dengan lumpur limbah yang secara fisik dan termal cenderung rapuh (Ma dkk., 2022). Oleh karena itu, pemanfaatan *bagasse* dalam penelitian ini tidak hanya dipandang sebagai sumber karbon, tetapi sebagai elemen struktural yang secara aktif menentukan kualitas fisik dan kimia *biochar* komposit.

Karakteristik kimia, proksimat, dan komposisi lignoselulosa *bagasse* yang relevan terhadap proses *pyrolysis* dan pembentukan *biochar* ditampilkan pada Tabel 2. 2.

Tabel 2. 2 Analisis Proksimat dan Ultimat Bahan Baku *Bagasse* (*Bagasse*)

Components	Wt. %
Ultimate	
<i>C</i>	42.50
<i>H</i>	6.17
<i>O</i>	51.00
<i>N</i>	0.23
<i>S</i>	0.10
Proximate	
<i>Moisture</i>	3,92
<i>Fixed carbon</i>	10,72
<i>Volatile matter</i>	82,65
<i>Ash</i>	2,71
Lignocellulose	
<i>Cellulose</i>	45.82
<i>Hemicellulose</i>	20.20
<i>Lignin</i>	21.32

(Sumber: Jamilatun dkk., (2022))

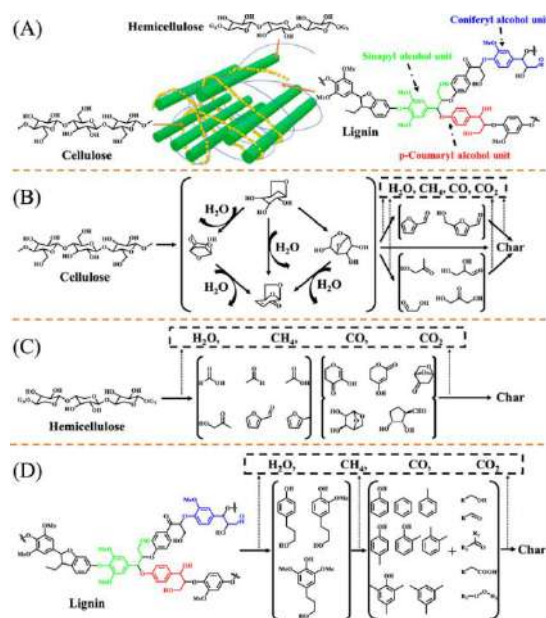
2.1.2.1 Lignoselulosa dan Pembentukan Kerangka Karbon

Secara struktural, dinding sel *bagasse* merupakan komposit alami yang tersusun atas tiga biopolimer utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Zafeer dkk. (2024) melaporkan bahwa *bagasse* umumnya mengandung selulosa sebesar 40–50%, hemiselulosa 25–30%, dan lignin 20–

25%. Data yang ditampilkan pada Tabel 2. 2 menunjukkan komposisi yang sebanding, dengan kandungan selulosa 45,82%, hemiselulosa 20,20%, dan lignin 21,32%.

Perbedaan struktur kimia ketiga komponen tersebut menyebabkan perbedaan stabilitas termal yang signifikan selama proses *pyrolysis*. Selulosa dan hemiselulosa merupakan polisakarida linear yang relatif mudah terdepolimerisasi dan terurai pada suhu rendah hingga menengah (<350 °C), menghasilkan fraksi zat terbang (*volatile matter*) yang tinggi. Sebaliknya, lignin memiliki struktur aromatik tiga dimensi yang kompleks dan sangat tahan terhadap panas (*thermally stable*), sehingga terdegradasi secara bertahap pada rentang suhu yang lebih luas (Jamilatun dkk., 2022).

Stabilitas termal lignin ini berkontribusi langsung terhadap pembentukan karbon tetap (*fixed carbon*). Berdasarkan analisis proksimat pada Tabel 2. 2, *bagasse* memiliki kandungan karbon tetap sebesar 10,72%, yang sebagian besar berasal dari fraksi lignin. Karbon aromatik hasil dekomposisi lignin inilah yang membentuk kerangka kaku dan berkesinambungan di dalam matriks *biochar*. Dalam sistem *biochar* komposit berbasis lumpur, kerangka karbon ini berfungsi sebagai penyangga struktural yang menjaga integritas material selama pemanasan dan mencegah keruntuhan struktur akibat beban mineral yang tinggi dari lumpur.



Gambar 2. 2 Skema degradasi termal
lignoselulosa

Sumber: (Lu & Gu, 2022)

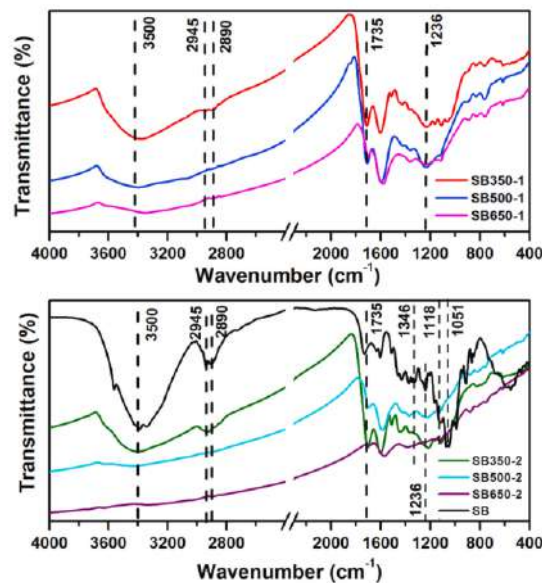
1. Gugus Fungsi Permukaan: Analisis Spektroskopi FTIR

Selain struktur fisik yang berpori, reaktivitas kimia *biochar bagasse* (*bagasse*) sangat ditentukan oleh kekayaan gugus fungsi pada permukaannya yang berperan sebagai situs aktif adsorpsi (Cao dkk., 2024; Chaudhary dkk., 2024). Identifikasi dan karakterisasi gugus fungsi ini umumnya dilakukan menggunakan spektroskopi inframerah transformasi Fourier (*Fourier Transform Infrared*, FTIR), yang banyak digunakan untuk menjelaskan mekanisme interaksi *biochar* dengan kontaminan logam berat (Hadey dkk., 2022).

Studi yang dilakukan oleh Veiga dkk. (2021) mengenai karakterisasi struktural *biochar bagasse* menunjukkan pola spektrum FTIR yang khas dan sensitif terhadap suhu *pyrolysis*. Pada *pyrolysis* suhu menengah hingga tinggi, spektrum FTIR memperlihatkan puncak serapan dominan pada bilangan gelombang 1550–1650 cm^{-1} yang merepresentasikan getaran peregangan (*stretching vibration*) dari ikatan rangkap karbon aromatik (C=C) dan gugus karbonil (C=O). Penguatan puncak ini menandai berlangsungnya proses aromatisasi

struktur karbon yang meningkatkan kestabilan kimia serta ketahanan *biochar* terhadap degradasi mikroba (Hassan dkk., 2020; J. Zhang dkk., 2020).

Pita serapan lebar pada sekitar 3400 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) masih terdeteksi, meskipun intensitasnya menurun seiring peningkatan suhu *pyrolysis* (Hadey dkk., 2022). Keberadaan gugus hidroksil residu ini menunjukkan bahwa *biochar* tetap mempertahankan fraksi gugus fungsi oksigenat yang berperan penting dalam reaktivitas permukaan.



Gambar 2. 3 Spektrum FTIR *biochar bagasse*

Sumber: (Veiga dkk., 2021).

Gugus fungsi oksigenat seperti karboksil ($-\text{COOH}$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) memiliki peran krusial dalam mekanisme remediasi logam berat. Pada kondisi pH tanah netral hingga basa, gugus-gugus ini mengalami deprotonasi sehingga permukaan *biochar* bermuatan negatif (Cao dkk., 2024; Mulyati dkk., 2025). Muatan negatif tersebut memungkinkan terjadinya interaksi dengan kation logam berat seperti Pb^{2+} melalui mekanisme pertukaran ion (*ion exchange*) dan kompleksasi permukaan (*surface complexation*) (Guo dkk., 2020).

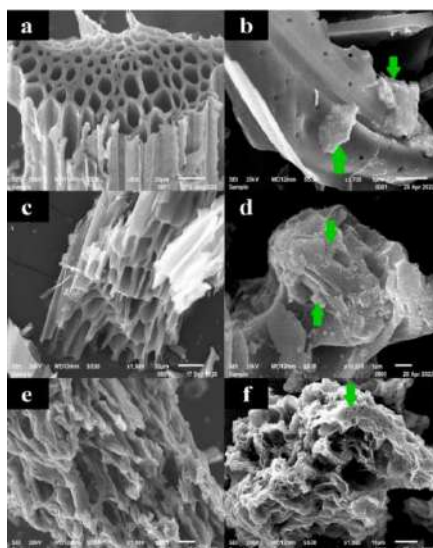
Dengan demikian, *biochar bagasse* tidak hanya berfungsi sebagai penopang fisik dalam matriks komposit, tetapi juga sebagai adsorben aktif yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan kapasitas imobilisasi logam berat di dalam tanah.

2. Peran sebagai Pembentuk Porositas Struktural

Peran penting lainnya dari *bagasse* dalam sistem *biochar* komposit adalah kemampuannya dalam membentuk porositas struktural. Berdasarkan analisis proksimat pada Tabel 2. 2, *bagasse* memiliki *volatile matter* yang sangat tinggi (82,65%) serta kadar abu yang rendah (2,71%). Komposisi ini sangat kontras dengan lumpur limbah yang umumnya kaya mineral dan abu.

Hassan dkk. (2020) menjelaskan bahwa biomassa dengan fraksi volatil tinggi akan mengalami devolatilisasi termal secara intensif selama *pyrolysis*. Pelepasan komponen volatil dalam bentuk gas meninggalkan rongga-rongga kosong (*voids*) di dalam matriks karbon, yang selanjutnya berkembang menjadi jaringan pori hirarkis yang saling terhubung.

Jeong dkk. (2016) menunjukkan bahwa *pyrolysis bagasse* pada suhu sekitar 500–550 °C mampu menghasilkan struktur pori menyerupai sarang lebah (*honeycomb structure*), dengan pori mikro hingga nano (~20 nm) yang berkembang pada dinding sel.



Gambar 2. 4 Citra SEM *biochar*
bagasse

Sumber: (Chaudhary dkk., 2024)

Pori mikro dan mesopori tersebut memperluas luas permukaan spesifik serta menyediakan situs aktif untuk adsorpsi fisik kation logam berat (Chaudhary dkk., 2024; Y. Wei dkk., 2025). Penataan arsitektur pori ini berkontribusi terhadap perbaikan kapasitas retensi air tanah (*water holding capacity*) (Moradi-choghamarani dkk., 2024). Karakteristik hidrologis ini cenderung terbatas pada *biochar* lumpur murni akibat risiko penyumbatan rongga oleh akumulasi fasa mineral anorganik (*ash clogging*) selama *pyrolysis* (Cao dkk., 2024)(Cao dkk., 2024). Sebaliknya, analisis struktural oleh (Veiga dkk., 2021) mengonfirmasi bahwa *pyrolysis* suhu tinggi memicu pelepasan zat terbang secara tuntas sehingga mengekspansi pembentukan jaringan pori di dalam dinding sel *bagasse*.

Berdasarkan komposisi lignoselulosa, karakteristik kimia, serta bukti morfologi dari literatur, *bagasse* dapat diposisikan sebagai komponen struktural kunci dalam formulasi *biochar* komposit. Perannya sebagai pembentuk kerangka karbon, penyedia gugus fungsi aktif, dan pengembang porositas menjadikan *bagasse* sangat relevan

untuk meningkatkan kinerja *biochar* dalam aplikasi remediasi tanah tercemar logam berat.

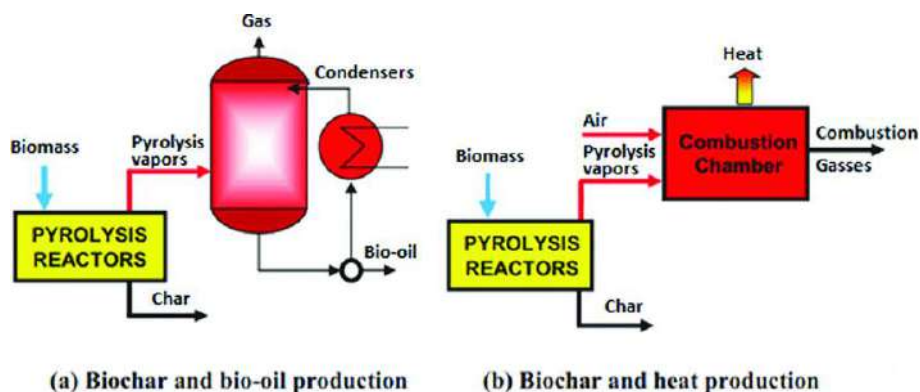
2.2 Teknologi *Pyrolysis* dan *Biochar*

2.2.1 Prinsip Dasar dan Mekanisme *Pyrolysis*

Pyrolysis merupakan proses degradasi termokimia material organik yang berlangsung pada kondisi atmosfer inert (tanpa oksigen) atau dengan suplai oksigen yang sangat terbatas (*oxygen-limited*) pada rentang suhu tinggi, umumnya antara 300–700 °C (Lehmann & Joseph, 2015). Proses ini bertujuan untuk memutus ikatan kimia kompleks penyusun biomassa lignoselulosa maupun limbah organik menjadi fraksi padat, cair, dan gas yang lebih sederhana dan stabil.

Mayilswamy dkk. (2023) menyatakan bahwa dalam konteks pengelolaan lingkungan, *pyrolysis* merupakan salah satu teknologi paling menjanjikan untuk manajemen lumpur limbah (*sewage sludge*). Teknologi ini menawarkan tiga keuntungan utama, yaitu: reduksi volume limbah secara signifikan (hingga lebih dari 50%), eliminasi total patogen biologis akibat perlakuan suhu tinggi, dan stabilisasi senyawa organik labil yang berpotensi mencemari lingkungan.

Produk utama dari proses *pyrolysis* adalah *biochar*, yaitu material padat kaya karbon dengan struktur berpori dan stabil secara kimia. Selain itu, dihasilkan pula produk samping berupa *bio-oil* (fase cair) dan *syngas* (fase gas). Skema neraca massa dan pembagian produk *pyrolysis* ditunjukkan pada Gambar 2. 5



Gambar 2. 5 Skematik proses *pyrolysis*

Sumber: (Zaman dkk., 2017)

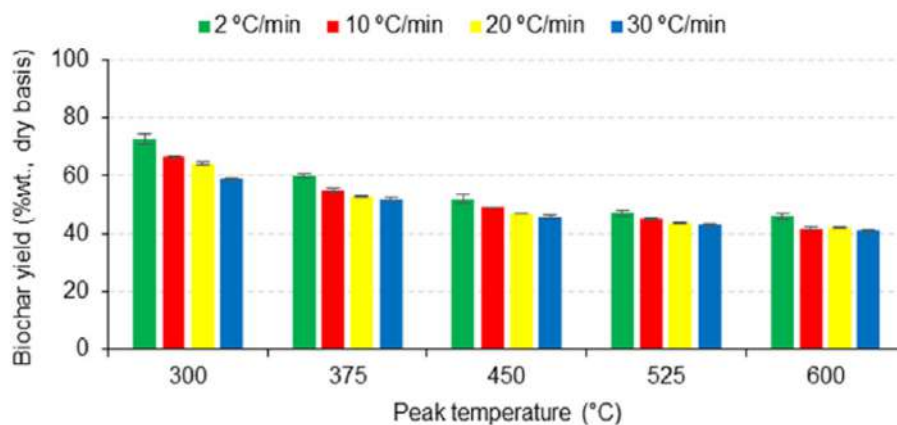
Kualitas produk *biochar* ditentukan oleh parameter operasi, khususnya suhu puncak *pyrolysis* dan karakteristik bahan baku penyusunnya (Hassan dkk., 2020). Pada tingkat molekuler, pemrosesan termal ini memicu transformasi struktur karbon alifatik yang labil menjadi jaringan aromatik terkondensasi (J. Zhang dkk., 2020). Kestabilan struktural sekunder tersebut meningkatkan ketahanan material terhadap degradasi mikrobiologis. Kondisi ini memungkinkan *biochar* berfungsi secara efektif sebagai medium sekuestrasi karbon jangka panjang di dalam matriks tanah (Guo dkk., 2020; Hadey dkk., 2022).

2.2.2 Pengaruh Suhu terhadap Karakteristik *Biochar*

Suhu *pyrolysis* atau *Highest Treatment Temperature* (HTT) merupakan variabel paling krusial dalam mengendalikan transformasi fisikokimia material selama proses karbonisasi. Variasi suhu tidak hanya mempengaruhi rendemen produk, tetapi juga menjadi determinan utama dalam evolusi morfologi pori dan gugus fungsi permukaan. Sebagaimana dijelaskan oleh Al-zyoud dkk. (2026), manipulasi sifat fisik *biochar* melalui kontrol suhu adalah pendekatan yang *robust* untuk mengoptimalkan kinerjanya sebagai adsorben, di mana parameter proses harus disesuaikan untuk mencapai keseimbangan antara stabilitas struktur dan reaktivitas permukaan.

2.2.2.1 Sifat Fisisk (Randemen dan Morfologi)

Secara termodinamika, peningkatan suhu *pyrolysis* berbanding terbalik dengan rendemen (*yield*) produk padat. Tarelho dkk. (2019) melaporkan bahwa pada *pyrolysis* lumpur biologis, kurva rendemen *biochar* menurun drastis seiring kenaikan suhu akibat pelepasan materi volatil dan dekomposisi termal senyawa organik. Fenomena ini dikonfirmasi oleh Setiani dkk. (2021) pada *pyrolysis* biomassa jagung, di mana suhu tinggi menyebabkan penyusutan massa yang signifikan demi mendapatkan struktur karbon yang lebih murni. Hubungan invers ini ditunjukkan secara visual pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Tren penurunan rendemen padatan *biochar*.

Sumber: Tarelho dkk. (2019)

Meskipun kuantitas produk menurun, pengorbanan massa ini terbayar dengan peningkatan kualitas struktur fisik. Imran dkk. (2025) menjelaskan bahwa suhu tinggi memicu pelepasan zat volatil yang sebelumnya menyumbat pori, sehingga secara drastis meningkatkan luas permukaan spesifik (*Specific Surface Area*, SSA). Peningkatan SSA ini sangat vital karena menyediakan lebih banyak situs aktif untuk mekanisme adsorpsi fisik. Hal ini sejalan dengan temuan Al-zyoud dkk. (2026), yang menegaskan bahwa porositas yang berkembang sempurna pada suhu tinggi berkorelasi positif dengan efisiensi penyisihan logam berat dari matriks tanah. Transformasi morfologi dari struktur tertutup menjadi berpori ini divisualisasikan pada Gambar 2. 7

Perubahan morfologi pori akibat perbedaan suhu *pyrolysis* ini sering divisualisasikan melalui kurva perbandingan antara ketersediaan pori dan suhu *pyrolysis* sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. 7.

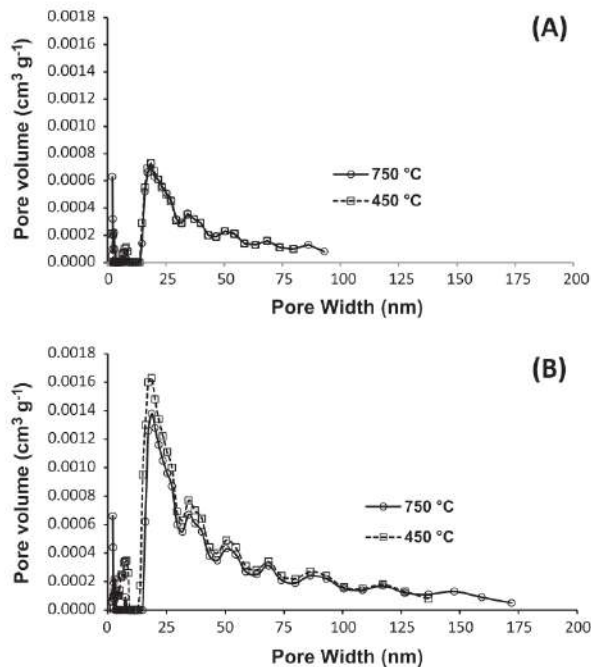


Fig. 2. Porosity distribution of biochars produced at 450 °C and 750 °C from sugarcane leaves (A) and rice straw (B).

Gambar 2. 7 Ilustrasi perbedaan morfologi pori permukaan *biochar*.

Sumber: (Jeong dkk., 2016)

2.2.2.2 Sifat Kimia (Stabilitas Karbon dan Gugus Fungsi)

Selain sifat fisik, suhu *pyrolysis* juga menentukan tingkat kematangan kimia *biochar*. S. Wei dkk. (2019) melaporkan bahwa fraksi karbon *biochar* berbasis lumpur sangat sensitif terhadap suhu perlakuan termal, terutama dalam hal stabilitas karbon dan kandungan karbon organik terlarut (*dissolved organic carbon*, DOC).

Sintesis perubahan karakteristik kimia *biochar* akibat peningkatan suhu dirangkum pada

Tabel 2. 3. Pada suhu rendah, *biochar* masih mengandung DOC dalam jumlah tinggi yang bersifat labil dan mudah terlindi. Sebaliknya,

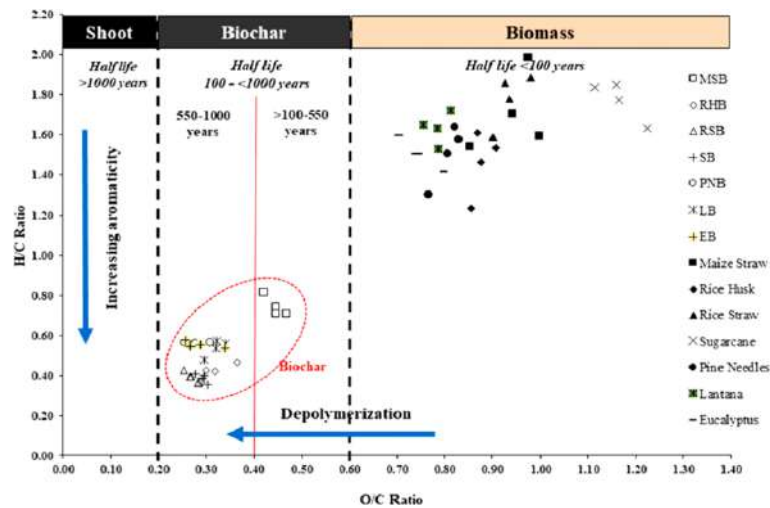
pyrolysis suhu tinggi secara efektif menurunkan DOC, meningkatkan karbon tetap, serta mendorong pembentukan struktur aromatik yang lebih stabil.

Tabel 2. 3 Perubahan Karakteristik Kimia *Biochar* Akibat Peningkatan Suhu

Parameter Kimia	Kondisi Pada Suhu Rendah (300 - 350°C)	Kondisi Pada Suhu Tinggi ($\geq 500^\circ\text{C}$)	Implikasi terhadap Kualitas <i>Biochar</i>
Karbon Organik Terlarut (DOC)	Tinggi (Dominan fraksi labil)	Sangat Rendah (Terdegradasi termal)	Suhu tinggi mencegah pelindian karbon (pencemaran air) dan meningkatkan resistensi terhadap dekomposisi mikroba.
Gugus Fungsi Permukaan	Kaya gugus Hidroksil (-OH) dan Alifatik (C-H).	Dominasi gugus Aromatik (C=C) dan struktur terkondensasi.	Suhu tinggi meningkatkan hidrofobisitas dan stabilitas struktur karbon jangka panjang.
Rasio Atom H/C (Aromatisitas)	Tinggi ($> 0,7$)	Rendah ($< 0,5$)	Semakin rendah rasio H/C, semakin tinggi derajat aromatisitas (kestabilan).
Karbon Tetap (<i>Fixed carbon</i>)	Rendah - Sedang	Tinggi	Suhu tinggi memaksimalkan sekuestrasi karbon di dalam tanah

(Sumber: Hassan dkk. 2020; Veiga dkk., 2021; S. Wei dkk., 2019)

Perubahan tingkat aromatisasi karbon akibat peningkatan suhu sering dianalisis menggunakan Diagram Van Krevelen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. 8. Penurunan rasio atom H/C dan O/C mencerminkan transisi biomassa mentah menuju *biochar* yang lebih terkondensasi dan stabil secara kimia.



Gambar 2. 8 Diagram Van Krevelen evolusi kimia biomassa menjadi *biochar*.

Sumber: Schimmelpfennig & Glaser (2012)

2.2.3 Strategi *Co-pyrolysis* dan Sinergitas Material

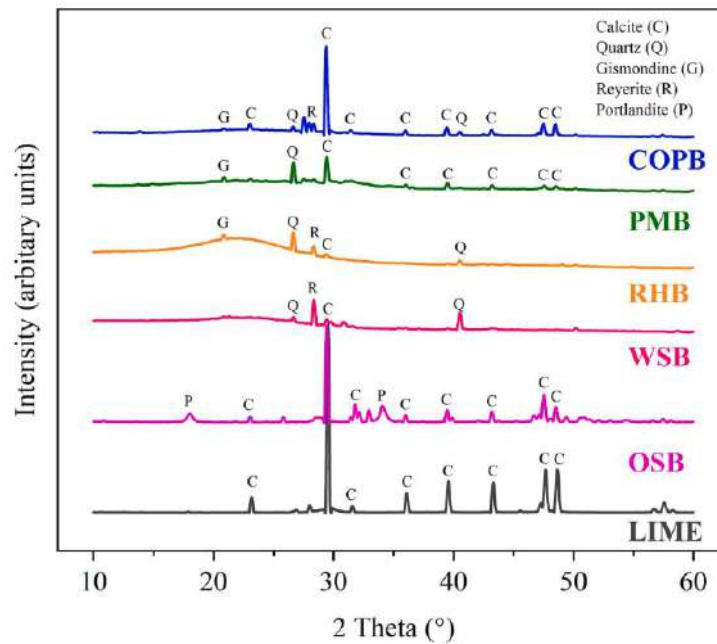
Co-pyrolysis merupakan metode konversi termal di mana dua atau lebih bahan baku dicampur secara homogen sebelum proses *pyrolysis* dan dipanaskan secara simultan dalam satu sistem reaktor. Pendekatan ini berbeda secara fundamental dari pencampuran fisik produk *biochar* pasca-*pyrolysis*, karena memungkinkan terjadinya interaksi termokimia antar-komponen selama fase degradasi dan reorganisasi karbon. Biney & Gusiatin (2024) serta Lian dkk. (2025) menegaskan bahwa *co-pyrolysis* merupakan strategi efektif untuk mengatasi keterbatasan *biochar* lumpur tunggal yang umumnya memiliki porositas rendah, struktur karbon kurang stabil, dan distribusi mineral yang tidak homogen.

Penambahan biomassa lignoselulosa seperti *bagasse* ke dalam matriks lumpur selama *co-pyrolysis* memicu efek sinergis non-linier yang tidak dapat dicapai melalui perlakuan termal tunggal. X. Chen dkk. (2022) menunjukkan bahwa interaksi radikal bebas antara senyawa volatil biomassa dan fraksi organik lumpur menurunkan energi aktivasi reaksi *pyrolysis*, sehingga suhu efektif konversi menjadi lebih rendah dibandingkan estimasi aditif teoritis. Selanjutnya, Ma dkk. (2022) menjelaskan bahwa volatil reaktif dari biomassa memicu reaksi *secondary cracking* pada komponen organik lumpur, yang

meningkatkan pembentukan pori mikro serta derajat aromatisasi karbon pada *biochar* komposit.

Keunggulan utama *co-pyrolysis* juga terletak pada kemampuannya membentuk struktur organo-mineral yang stabil secara *in-situ*. Mohamed dkk., (2023) dan J. Zhang dkk. (2020) melaporkan bahwa integrasi biomassa dan lumpur selama *pyrolysis* mampu menurunkan potensi pelindian logam berat hingga lebih dari 90%. Dalam sistem ini, matriks lignin dari *bagasse* berperan sebagai kerangka karbon (*carbon skeleton*) yang menopang struktur pori, sementara fraksi mineral dan fosfat dari lumpur terinkorporasi secara merata ke dalam jaringan karbon selama proses karbonisasi. Struktur komposit ini secara signifikan meningkatkan stabilitas logam berat dan kapasitas sorpsi terhadap polutan pada tanah masam (Duan dkk., 2020).

Mekanisme sinergis antara biomassa dan material kaya mineral selama *co-pyrolysis* tercermin pada perubahan fase mineral yang teridentifikasi melalui analisis difraksi sinar-X. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 9, *biochar* hasil *co-pyrolysis* (COPB) memperlihatkan keberadaan fase kalsit, kuarsa, dan mineral silikat lainnya yang terdistribusi dalam matriks karbon. Kehadiran fase-fase ini mengindikasikan terjadinya integrasi mineral secara *in-situ* selama proses konversi termal, yang berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas struktur dan potensi imobilisasi logam berat pada aplikasi tanah.



Gambar 2. 9 Pola difraksi sinar-X (XRD) dari berbagai *feedstock biochar*.

Sumber: Lian dkk. (2025)

Dengan demikian, *co-pyrolysis* tidak hanya berfungsi sebagai teknik pencampuran, tetapi merupakan pendekatan rekayasa material *in-situ* untuk menghasilkan *biochar* komposit organo-mineral dengan stabilitas struktural, reaktivitas kimia, dan potensi remediasi yang lebih unggul.

2.2.4 Seleksi dan Skoring *Biochar*

Pemilihan *biochar* untuk aplikasi remediasi tanah tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu parameter tunggal, melainkan harus mempertimbangkan kombinasi berbagai karakteristik fisik dan kimia yang mempengaruhi performa *biochar* dalam tanah. Oleh karena itu, beberapa penelitian menggunakan pendekatan *multi-criteria assessment* atau sistem skoring berbobot (*weighted scoring system*) untuk mengevaluasi kualitas *biochar* secara komprehensif (Chaudhary dkk., 2024; Pelleri dkk., 2021).

Metode skoring *biochar* merupakan pendekatan semi-kuantitatif yang mengintegrasikan berbagai parameter karakterisasi *biochar* ke dalam satu nilai total evaluasi. Pendekatan ini banyak digunakan karena mampu mengurangi subjektivitas dalam proses seleksi serta memberikan dasar ilmiah yang lebih

kuat dalam menentukan kandidat *biochar* terbaik untuk aplikasi tertentu, termasuk remediasi logam berat dan remediasi tanah (Guo dkk., 2020).

Pada penelitian remediasi tanah tercemar logam berat, parameter seperti *fixed carbon* (FC), *volatile matter* (VM), pH, kadar abu (*ash content*), *electrical conductivity* (EC), dan kadar air (*moisture content*) menjadi parameter utama yang umum digunakan dalam proses evaluasi *biochar* (Hassan dkk., 2020; Tomczyk dkk., 2020). Parameter-parameter tersebut berhubungan langsung dengan stabilitas karbon, tingkat karbonisasi, kandungan mineral, kapasitas adsorpsi, serta kemampuan imobilisasi logam berat (Mohamed dkk., 2023).

Nilai *fixed carbon* digunakan sebagai indikator utama stabilitas karbon *biochar*. Semakin tinggi nilai FC menunjukkan semakin dominannya struktur karbon aromatik yang terbentuk selama proses *pyrolysis*. Struktur karbon aromatik memiliki ketahanan degradasi yang lebih tinggi serta menyediakan situs adsorpsi yang lebih baik terhadap kontaminan logam berat (S. Wei dkk., 2019). Sebaliknya, *volatile matter* yang rendah menunjukkan tingkat karbonisasi yang lebih sempurna dan *biochar* yang lebih stabil secara termal maupun kimiawi.

Selain parameter karbonisasi, sifat kimia *biochar* juga sangat menentukan performa remediasi logam berat. Nilai pH *biochar* yang bersifat alkalis dapat meningkatkan proses presipitasi logam Pb menjadi bentuk yang kurang larut sehingga menurunkan mobilitas dan bioavailabilitas logam dalam tanah (Cao dkk., 2024; Vannini dkk., 2021). Kadar abu dan nilai EC juga berperan dalam menyediakan mineral alkalis seperti Ca, Mg, dan K yang mendukung proses pertukaran ion dan pembentukan kompleks logam (Guo dkk., 2020).

Metode skoring berbobot dilakukan dengan mengkonversi masing-masing parameter ke dalam skala numerik tertentu, kemudian dikalikan dengan bobot berdasarkan tingkat kepentingannya terhadap tujuan aplikasi *biochar*.

Parameter yang memiliki pengaruh lebih besar terhadap mekanisme remediasi diberikan bobot yang lebih tinggi dibanding parameter pendukung lainnya.

Dalam penelitian ini, parameter FC dan pH diberikan bobot terbesar karena keduanya berperan dominan dalam mekanisme stabilisasi karbon dan imobilisasi Pb (Mohamed dkk., 2023). Parameter VM diberikan bobot menengah sebagai indikator tingkat karbonisasi, sedangkan kadar abu, EC, dan kadar air digunakan sebagai parameter pendukung dalam evaluasi kualitas *biochar* secara keseluruhan.

Pendekatan ini dinilai sesuai untuk penelitian *biochar* berbasis karakterisasi proksimat karena mampu memberikan evaluasi kuantitatif terhadap pengaruh suhu *pyrolysis* dan komposisi bahan baku terhadap kualitas *biochar* yang dihasilkan (Hassan dkk., 2020; J. Zhang dkk., 2020).

2.3 Sifat Fisik tanah dan Hidrologi

Kualitas fisik tanah merupakan parameter fundamental yang mengendalikan fungsi hidrologis lahan, khususnya dalam konteks remediasi tanah tercemar logam berat. Struktur fisik tanah menentukan kemampuan tanah dalam mengatur pergerakan air, udara, dan zat terlarut, sekaligus mempengaruhi aktivitas biologis dan penetrasi akar tanaman. L. Zhang & Fan (2025) dalam tinjauan terbarunya mengenai hidrodinamika tanah (*soil hydrodynamics*) menegaskan bahwa degradasi struktur tanah seperti pemadatan, penyumbatan pori, dan hilangnya pori makro akan menurunkan konduktivitas hidrolik jenuh serta membatasi difusi zat terlarut di dalam profil tanah.

Pada tanah tercemar, terutama yang mengalami tekanan antropogenik tinggi, degradasi kualitas fisik sering kali berjalan bersamaan dengan penurunan kualitas kimia dan biologis tanah (Mohamed dkk., 2023). Oleh karena itu, rekayasa fisik tanah melalui penambahan agen remediasi berpori seperti *biochar* diarahkan untuk memulihkan arsitektur tanah (*soil architecture*), yaitu konfigurasi tiga dimensi pori dan agregat tanah yang berfungsi sebagai media penyangga air, udara, dan nutrisi.

Pada tanah tercemar, terutama yang mengalami tekanan antropogenik tinggi, degradasi kualitas fisik sering kali berjalan bersamaan dengan penurunan kualitas kimia dan biologis tanah Mohamed dkk. (2023). Oleh karena itu, rekayasa fisik tanah melalui penambahan material berpori seperti *biochar* diarahkan untuk memulihkan arsitektur tanah (*soil architecture*), yaitu konfigurasi tiga dimensi pori dan agregat tanah yang berfungsi sebagai media penyangga air, udara, dan nutrisi (Brady & Weil, 2016). Penggunaan *biochar* dari biomassa berserat seperti *bagasse* sangat strategis karena struktur pori hirarkisnya mampu memperbaiki distribusi ruang pori tersebut secara signifikan.

2.3.1 Hubungan Densitas Tanah dan Porositas

Densitas tanah atau Berat Isi (*Bulk density*/BD) didefinisikan sebagai perbandingan antara massa tanah kering terhadap volume total tanah, yang mencakup volume partikel padat dan ruang pori. Parameter ini merupakan indikator utama tingkat pemadatan tanah dan memiliki hubungan invers (berbanding terbalik) dengan porositas total.

Sebaliknya, Densitas Partikel (*Particle Density*/PD) merepresentasikan massa partikel padat tanah per satuan volume partikel padatnya saja, tanpa memperhitungkan ruang pori. Untuk tanah mineral, nilai PD umumnya dianggap konstan sebesar 2,65 g/cm³, yang mencerminkan densitas rata-rata mineral silikat penyusun tanah seperti kuarsa dan feldspar (Brady & Weil, 2016).

Hubungan antara BD, PD, dan porositas total (*n*) dapat dijelaskan melalui persamaan berikut :

$$n = 1 - \frac{BD}{PD} \times 100 \quad (2.1)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan nilai BD, yang menandakan tanah semakin padat, akan menurunkan proporsi ruang pori yang tersedia untuk pergerakan air dan udara. Karena nilai PD relatif konstan pada tanah mineral, perubahan porositas tanah pada umumnya lebih dikendalikan

oleh variasi BD akibat pemadatan mekanis atau penambahan agen remediasi tanah.

Penurunan BD akibat aplikasi *biochar* terjadi melalui mekanisme yang dikenal sebagai efek pengenceran (*dilution effect*). Wu dkk. (2022) melalui meta-analisis global melaporkan bahwa penambahan *biochar* secara konsisten menurunkan BD tanah, terutama ketika *biochar* yang diaplikasikan memiliki densitas partikel yang jauh lebih rendah ($< 0,6 \text{ g/cm}^3$) dibandingkan tanah mineral. Pencampuran material ringan dan berpori ini ke dalam matriks tanah menyebabkan penurunan massa per satuan volume, sehingga meningkatkan porositas total tanah.

Data kuantitatif mengenai dampak penambahan *biochar* terhadap parameter fisik tanah dirangkum dalam Tabel 2. 4 berikut.

Tabel 2. 4 Dampak Penambahan *Biochar* terhadap Parameter Fisik Tanah

Parameter Fisik Tanah	Perubahan Rata-rata (%)	Faktor Penentu Utama	Mekanisme Perbaikan
Berat Isi (<i>Bulk density</i>)	Menurun 7,6%	Dosis penambahan <i>biochar</i> dan tekstur tanah	<i>Dilution effect</i> : <i>biochar</i> yang ringan ($<0,6 \text{ g/cm}^3$) menggantikan volume tanah mineral yang lebih berat.
Porositas Total	Meningkat 8,4%	Luas permukaan spesifik (SSA)	Penambahan volume pori internal <i>biochar</i> ke dalam matriks tanah.
Kapasitas Menahan Air (WHC)	Meningkat 15,1%	Struktur mikropori	Pori nano–mikro pada <i>biochar</i> meningkatkan gaya kapilaritas sehingga air tertahan lebih lama.
Konduktivitas Hidrolik Jenuh	Meningkat 25,3%	Ukuran partikel <i>biochar</i>	Pembentukan jalur aliran dan pori makro antar-partikel meningkatkan laju infiltrasi dan drainase.
Kadar Air Kapasitas Lapang	Meningkat 25,4%	Tekstur tanah (pasir vs lempung)	Modifikasi distribusi ukuran pori tanah (<i>soil pore size distribution</i>) yang memperbaiki retensi air.

(Sumber: Wu dkk. (2022))

Berdasarkan Tabel 2. 4, terlihat bahwa penurunan berat isi tanah berkorelasi positif dengan peningkatan porositas total dan kapasitas menahan air. Dalam konteks tanah tercemar yang mengalami pemadatan, penambahan *biochar* komposit berbasis *bagasse* diharapkan mampu menurunkan BD secara signifikan, memperbaiki konektivitas pori, serta menciptakan jalur aliran air yang lebih efisien. Perbaikan sifat fisik ini menjadi prasyarat penting bagi

keberhasilan remediasi kimia dan biologis pada tahap selanjutnya, termasuk peningkatan mobilitas terkendali logam berat dan penetrasi sistem perakaran tanaman.

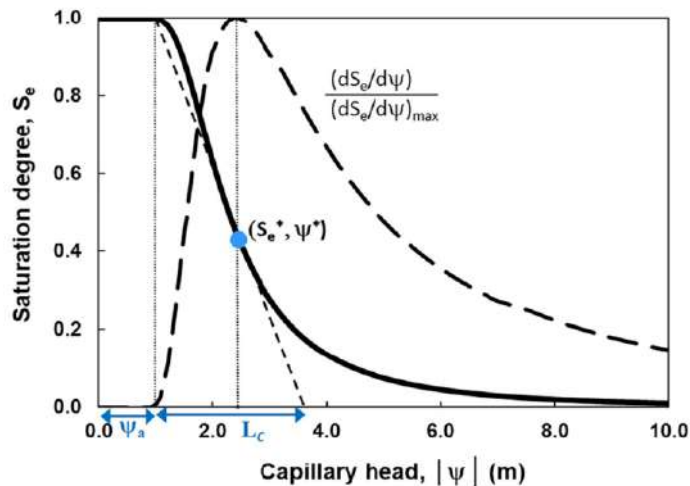
2.3.2 Dinamika Infiltrasi Air dalam Tanah

Kemampuan tanah dalam meloloskan air (*infiltration*) dan menahannya (*retention*) sangat ditentukan oleh karakteristik energi air tanah. Assouline (2021) menyatakan bahwa Kurva Retensi Air Tanah (*Soil Water Retention Curve*/SWRC) merupakan sidik jari hidrologis yang menggambarkan hubungan fundamental antara kadar air volumetrik tanah dan potensial matriks (gaya hisap tanah).

Tanah yang mengalami degradasi struktur, terutama akibat pemadatan dan hilangnya pori fungsional, cenderung kehilangan kemampuan menahan air pada potensial rendah. Kondisi ini menyebabkan air cepat hilang melalui drainase gravitasi atau evaporasi, sehingga menurunkan ketersediaan air bagi tanaman.

B. Wei dkk. (2023) menjelaskan bahwa penambahan *biochar* mampu memodifikasi karakteristik SWRC melalui dua mekanisme berikut:

1. Pori Inter-partikel (Makropori): Pori ini terbentuk di antara partikel *biochar* dan partikel mineral tanah. Keberadaannya berperan penting dalam meningkatkan laju infiltrasi dan aerasi tanah pada kondisi jenuh (*saturated flow*), sehingga mengurangi limpasan permukaan (*runoff*) yang berpotensi membawa polutan.
2. Pori Intra-partikel (Mikropori): Pori ini merupakan pori internal yang berkembang di dalam struktur kerangka karbon *biochar*. Mikropori berfungsi menahan air pada kondisi tanah tidak jenuh melalui gaya kapilaritas yang kuat, sehingga meningkatkan fraksi air yang tersedia bagi tanaman (*Plant Available Water*).



Gambar 2. 10 Pergeseran kurva retensi air (SWRC) akibat *biochar*

Sumber: Assouline (2021).

Dalam konteks penelitian ini, penggunaan *biochar* komposit menjadi sangat strategis. Struktur berserat *bagasse* berkontribusi terhadap pembentukan makropori yang mempercepat infiltrasi dan mencegah limpasan, sementara pori mikro dari *sludge char* dan *bagasse char* bekerja sinergis sebagai reservoir air yang menjaga kelembapan tanah dalam jangka waktu lebih lama.

2.3.3 Pengaruh Remediasi *Biochar* terhadap Struktur Tanah

Selain memengaruhi dinamika air, penambahan *biochar* juga berperan penting dalam memperbaiki struktur fisik tanah melalui peningkatan stabilitas agregat. Struktur tanah yang baik dicirikan oleh terbentuknya agregat yang stabil terhadap air (*water-stable aggregates*), yang tidak mudah terdispersi saat terkena hujan atau irigasi.

Agregat tanah terbentuk dari penyatuan partikel primer tanah (pasir, debu, dan liat) menjadi unit yang lebih besar dan lebih stabil. S. Chen dkk. (2024) melaporkan bahwa pembentukan agregat makro ($>0,25$ mm) sangat dipengaruhi oleh keberadaan karbon organik stabil. Studi tersebut menunjukkan bahwa penambahan *biochar* lebih efektif meningkatkan agregasi tanah dibandingkan pengembalian residu tanaman segar, karena struktur karbon aromatik *biochar* bersifat rekalsitran dan tahan terhadap dekomposisi.

Peningkatan stabilitas agregat oleh *biochar* komposit (lumpur-*bagasse*) terjadi melalui beberapa mekanisme fisika-kimia utama :

1) Agen Pengikat (*Cementing Agent*)

Gugus fungsi oksigenat pada permukaan *biochar* (seperti karboksilat dan fenolat) bertindak sebagai “lem” organik yang mengikat partikel lempung dan debu, membentuk mikro-agregat yang lebih stabil. Keberadaan gugus fungsi ini pada *biochar bagasse* telah diidentifikasi melalui analisis struktural oleh Veiga dkk. (2021), yang menunjukkan peran penting oksigenat permukaan dalam interaksi dengan matriks tanah.

2) Jembatan Kation (*Cation Bridging*)

Imran dkk. (2025) menjelaskan bahwa kation polivalen seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} menjembatani permukaan bermuatan negatif antara partikel liat dan *biochar*. Mekanisme ini memperkuat kohesi antar partikel dan mengurangi dispersi liat yang dapat menyebabkan penyumbatan pori. Hal ini didukung oleh karakteristik mineralogi *biochar bagasse* yang mampu memfasilitasi pertukaran kation di permukaan tanah (Zafeer dkk., 2024).

3) Aktivitas Biologis Tanah

Struktur berpori *biochar* menyediakan habitat mikro bagi akar halus dan hifa jamur. Eksudat biologis berupa polisakarida dan senyawa lengket lainnya memperkuat ikatan antar partikel, meningkatkan stabilitas agregat makro, dan menurunkan kerentanan tanah terhadap erosi (Zafeer dkk., 2024).

Dengan demikian, *biochar* komposit tidak hanya berfungsi sebagai pengisi fisik, tetapi juga sebagai agen rekayasa struktur tanah yang mampu mengubah tanah padat (*massive structure*) menjadi tanah berstruktur remah (*crumb structure*) yang ideal bagi pergerakan air, pertumbuhan akar, dan stabilitas jangka panjang.

2.4 Logam Berat dalam Tanah dan Remediasi

Kontaminasi tanah oleh logam berat merupakan ancaman lingkungan global yang bersifat persisten karena karakteristiknya yang tidak dapat

terdegradasi secara biologis (*non-biodegradable*) serta kecenderungannya untuk terakumulasi di dalam rantai makanan (*bioaccumulation*). Dalam konteks remediasi lahan pertanian, perhatian utama diarahkan pada logam Timbal (Pb) karena tingkat toksisitasnya yang tinggi dan dampaknya yang langsung terhadap kesehatan tanaman serta keamanan pangan. Berdasarkan Lampiran VI Peraturan Pemerintah (PP) No. 22 Tahun 2021, ambang batas kandungan Timbal (Pb) di dalam tanah dibatasi maksimal sebesar 150 mg/kg untuk peruntukan lahan selain permukiman (termasuk lahan pertanian dan industri). Penetapan baku mutu ini menjadi acuan krusial karena konsentrasi Pb yang melampaui batas tersebut dapat menimbulkan risiko lingkungan yang tidak dapat ditoleransi.

Berbeda dengan logam seperti Seng (Zn) atau Tembaga (Cu) yang pada konsentrasi tertentu berperan sebagai mikronutrien esensial, Timbal diklasifikasikan sebagai logam non-esensial (*xenobiotik*). Artinya, Pb tidak memiliki fungsi biologis apa pun bagi organisme hidup dan bersifat toksik mutlak bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah (Oksanen dkk., 2023).

Imran dkk. (2025) dalam tinjauan fisiotoksikologinya menjelaskan bahwa keberadaan Timbal dalam bentuk yang tersedia secara hayati (*bioavailable*) dapat menyebabkan kerusakan sistemik pada tanaman. Dampak tersebut meliputi penghambatan aktivitas enzim metabolik, gangguan integritas membran sel, disfungsi kloroplas yang menurunkan laju fotosintesis, serta induksi stres oksidatif melalui pembentukan spesies oksigen reaktif (*Reactive Oxygen Species* / ROS).

Berdasarkan karakteristik tersebut, strategi remediasi Timbal dalam penelitian ini tidak diarahkan pada penghilangan total logam dari tanah, melainkan difokuskan pada imobilisasi total, yaitu mengubah Pb menjadi bentuk kimia yang stabil, tidak larut, dan tidak dapat diserap oleh sistem perakaran tanaman.

2.4.1 Karakteristik dan Mobilitas Timbal (Pb)

Perilaku geokimia Timbal (Pb) di dalam tanah dikendalikan secara kuat oleh kondisi lingkungan, terutama derajat keasaman (pH). Secara umum, Pb memiliki afinitas tinggi terhadap bahan organik dan mineral lempung,

sehingga cenderung terikat kuat pada fase padat tanah. Namun, stabilitas ikatan ini bersifat dinamis dan dapat terganggu pada kondisi tertentu.

Rolka dkk. (2023) menjelaskan bahwa pada kondisi tanah masam ($\text{pH} < 5,5$), konsentrasi ion hidrogen (H^+) yang tinggi akan berkompetisi dengan ion Pb^{2+} untuk menempati situs pertukaran kation pada permukaan koloid tanah. Proses kompetisi ini menyebabkan terjadinya desorpsi Pb dari permukaan padatan, sehingga Pb larut ke dalam larutan tanah (*soil pore water*). Dalam bentuk ion bebas (Pb^{2+}), Timbal menjadi sangat mobil, memiliki bioavailabilitas tinggi, serta berpotensi terlindi (*leaching*) menuju lapisan tanah yang lebih dalam dan mencemari air tanah.

Sebaliknya, pada kondisi pH netral hingga basa, mobilitas Timbal (Pb) menurun secara signifikan karena kelarutannya yang sangat sensitif terhadap perubahan derajat keasaman. Rolka dkk. (2023) menjelaskan bahwa pada kondisi basa, ion logam bebas akan bereaksi membentuk senyawa hidroksida atau karbonat logam yang tidak larut, sehingga mobilitasnya berkurang drastis. Peningkatan pH ini memicu pembentukan endapan seperti $\text{Pb}(\text{OH})_2$, atau mineral Cerussite (PbCO_3). Selain itu, dalam keberadaan fosfat, Pb dapat membentuk mineral fosfat yang sangat stabil seperti *Pyromorphite* ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$).

Perubahan spesiasi inilah yang menjadi dasar ilmiah utama dalam pemilihan *biochar* komposit sebagai agen remediasi, khususnya *biochar* yang memiliki sifat alkalinitas tinggi dan mengandung sumber fosfat. Karakteristik geokimia Timbal serta implikasinya terhadap strategi remediasi dirangkum dalam Tabel 2. 5.

Tabel 2. 5 Perbandingan Karakteristik Geokimia Timbal (Pb)

Parameter Karakteristik	Karakterisasi Timbal (Pb)	Implikasi Remediasi
Status Biologis	Non-Esensial (Xenobiotik).	Target remediasi diarahkan pada imobilisasi total, bukan biofortifikasi

Parameter Karakteristik	Karakterisasi Timbal (Pb)	Implikasi Remediasi
Bentuk Mobilitas	Dominan sebagai ion Pb^{2+} pada pH asam ($< 5,5$)	Diperlukan remediasi yang mampu menaikkan pH tanah
Spesiasi Endapan	Menghasilkan senyawa tidak larut seperti $Pb(OH)_2$, $PbCO_3$, dan $Pb_5(PO_4)_3Cl$ (<i>Pyromorphite</i>)	Memerlukan suplai ion OH^- dan fosfat
Mekanisme Toksisitas	Mengganggu enzim dan pembelahan sel	Pb harus diikat sebelum mencapai zona rizosfer
Afinitas Adsorpsi	Sangat kuat terhadap gugus karboksil ($-COOH$) dan fenolik ($-OH$)	<i>Biochar</i> kaya gugus oksigenat meningkatkan kompleksasi Pb

Sumber: (Hadey dkk., 2022; Imran dkk., 2025; Oksanen dkk., 2023; Rolka dkk., 2023)

2.4.2 Mekanisme Remediasi Logam oleh *Biochar*

Remediasi tanah menggunakan *biochar* tidak bertujuan untuk mengekstraksi logam berat keluar dari sistem tanah, melainkan mengubah spesiasi logam dari bentuk terlarut (mobile) dan toksik menjadi bentuk terikat (immobile) yang lebih stabil dan aman bagi tanaman. Pendekatan ini diklasifikasikan sebagai stabilisasi *in-situ*, di mana *biochar* berfungsi sebagai matriks penjebak (*immobilizing matrix*) melalui kombinasi interaksi fisik dan kimia (Y. Wei dkk., 2025).

Efektivitas imobilisasi Timbal (Pb) dalam sistem tanah yang diremediasi *biochar* sangat dipengaruhi oleh karakteristik material penyusunnya. *Biochar* berbasis biomassa lignoselulosa, seperti *bagasse*, menyediakan struktur berpori dan gugus fungsi permukaan yang berperan sebagai situs adsorpsi logam. Sementara itu, komponen mineral dan fosfat yang berasal dari lumpur limbah (*sludge*) berkontribusi dalam meningkatkan stabilitas kimia Pb di dalam matriks tanah (Mohamed dkk., 2023; J. Zhang dkk., 2020).

Pada sistem *biochar* komposit hasil *co-pyrolysis*, kedua komponen tersebut berinteraksi secara sinergis. Matriks karbon berpori berfungsi sebagai kerangka penyangga, sedangkan fraksi mineral terdistribusi di dalam pori-pori

karbon, sehingga memperkuat kemampuan tanah dalam menahan Pb dan menekan mobilitasnya. Beberapa studi melaporkan bahwa pendekatan ini mampu menurunkan fraksi Pb yang mudah larut dan meningkatkan proporsi Pb dalam bentuk yang lebih stabil, sehingga risiko lingkungan dapat ditekan secara signifikan (Duan dkk., 2020; Mohamed dkk., 2023).

Dengan demikian, penambahan *biochar* komposit berbasis *co-pyrolysis* berpotensi menjadi strategi remediasi yang efektif dan berkelanjutan, khususnya pada tanah masam yang rentan terhadap mobilitas Pb, tanpa memerlukan proses ekstraksi atau pengangkatan tanah tercemar.

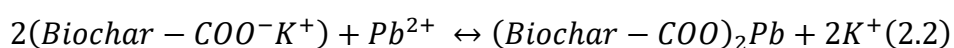
2.4.2.1 Adsorpsi Fisik dan Pertukaran Ion

Mekanisme awal imobilisasi logam berat oleh *biochar* terjadi melalui adsorpsi fisik pada permukaan dan di dalam jaringan pori material. Biomassa berserat seperti *bagasse* (*bagasse*) memiliki struktur lignoselulosa yang, setelah *pyrolysis*, berkembang menjadi kerangka karbon berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi.

Jeong dkk. (2016) melaporkan bahwa *biochar bagasse* yang *dipyrolysis* pada suhu sekitar 550 °C menunjukkan dominasi pori berukuran nano (± 20 nm). Ukuran pori ini jauh lebih besar dibandingkan jari-jari hidrat ion Pb^{2+} , sehingga ion logam dapat masuk dan terperangkap di dalam jaringan pori melalui gaya Van der Waals. Penjebakan ini secara signifikan menurunkan mobilitas Pb di dalam tanah dan membatasi pergerakannya menuju larutan tanah (*soil solution*).

Selain adsorpsi fisik, *biochar* juga berperan aktif melalui mekanisme pertukaran ion (*ion exchange*). Permukaan *biochar* mengandung gugus fungsi beroksigen seperti karboksil ($-COOH$) dan hidroksil ($-OH$), sebagaimana teridentifikasi melalui analisis FTIR oleh Veiga dkk. (2021). Gugus-gugus ini dapat melepaskan ion H^+ atau kation basa (misalnya K^+ , Na^+ , dan Ca^{2+}) dan menukarnya dengan ion logam berat dari larutan tanah.

Secara sederhana, reaksi pertukaran ion tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :



Pada reaksi ini, ion Pb^{2+} yang bersifat toksik terikat kuat pada permukaan *biochar*, sedangkan ion K^+ dilepaskan ke dalam tanah dan berpotensi berkontribusi sebagai unsur hara bagi tanaman. Elisa dkk. (2024) melaporkan bahwa aktivasi permukaan *biochar* berbasis biomassa mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi dan kapasitas tukar kation secara signifikan terhadap ion logam terlarut.

2.4.2.2 Presipitasi Kimiawi dan Imobilisasi Timbal (Pb)

Selain mekanisme adsorpsi, imobilisasi Timbal (Pb) dalam tanah juga berlangsung melalui mekanisme presipitasi kimiawi, yang umumnya menghasilkan bentuk Pb yang lebih stabil dalam jangka panjang. Presipitasi ini dipicu oleh kenaikan pH mikro-lingkungan tanah di sekitar partikel *biochar*, yang berasal dari kandungan mineral anorganik dan sifat basa *biochar* hasil proses *pyrolysis*.

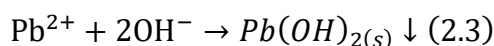
Szostek dkk. (2024) menjelaskan bahwa material biomassa hasil pembakaran atau *pyrolysis* umumnya memiliki fraksi abu mineral berfungsi sebagai *liming agent* karena memiliki kandungan oksida basa seperti CaO , MgO , K_2O serta karbonat yang tinggi. Ketika abu bercampur dengan tanah, pelarutannya melepaskan ion hidroksida (OH^-) dan karbonat (CO_3^{2-}), yang menyebabkan kenaikan pH secara langsung.

Kenaikan pH tanah tetap dapat terjadi akibat sifat intrinsik *biochar* itu sendiri. Zafeer dkk. (2024) menjelaskan bahwa *biochar* dari *bagasse* umumnya bersifat basa karena mengandung akumulasi abu mineral selama proses *pyrolysis*. Mineral-mineral ini, yang mencakup karbonat, oksida, dan silikat dari logam alkali serta alkali tanah, dilepaskan ke dalam larutan tanah dan bertindak sebagai agen penetral keasaman (Kuncara dkk., 2024). Selain itu, penggunaan *sludge* sebagai bahan baku turut menyumbang fraksi mineral anorganik yang signifikan, yang menurut Szostek dkk. (2024), berperan penting sebagai penyangga pH (*buffering agent*) untuk menstabilkan kondisi kimia tanah yang sebelumnya masam.

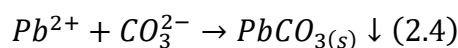
Pada kondisi pH yang meningkat, ion Pb^{2+} menjadi tidak stabil dalam bentuk terlarut dan akan bereaksi dengan anion hidroksida dan

karbonat di dalam tanah membentuk mineral endapan yang tidak larut (*insoluble precipitates*), sebagaimana dijelaskan oleh Rolka dkk. (2023).

1. Pembentukan Hidroksida Timbal :

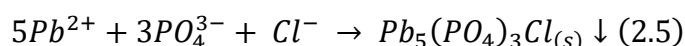


2. Pembentukan Karbonat (*Cerussite*) :



Selain itu, kontribusi paling signifikan terhadap stabilitas jangka panjang berasal dari kandungan fosfor dalam lumpur limbah (*sludge*). Mohammadi Galangash dkk. (2018) melaporkan bahwa lumpur hasil pengolahan biologis umumnya kaya akan fosfat reaktif. Fosfat ini memiliki afinitas yang sangat tinggi terhadap Timbal dan mampu membentuk mineral *Pyromorphite* ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$), yang dikenal sebagai spesies Pb paling stabil secara geokimia.

Reaksi pembentukan *Pyromorphite* dapat dituliskan sebagai berikut :



Oksanen dkk. (2023) menyatakan bahwa *Pyromorphite* memiliki kelarutan yang sangat rendah dan hampir tidak bioavailable, sehingga secara efektif menghilangkan Pb dari siklus biologis tanah–tanaman. Transformasi Pb menjadi bentuk yang sangat stabil ini sangat krusial guna memastikan bahwa hasil akhir remediasi mampu menekan konsentrasi Pb yang tersedia secara hayati hingga tetap berada di bawah ambang batas aman 100 mg/kg sesuai standar baku mutu PP No. 22 Tahun 2021.

Berdasarkan mekanisme adsorpsi dan presipitasi kimiawi yang telah diuraikan, evaluasi efektivitas *biochar* tunggal dan *biochar* komposit dalam memperbaiki kualitas tanah serta menurunkan mobilitas Timbal (Pb) dilakukan melalui pengukuran sejumlah parameter kunci yang merepresentasikan perubahan sifat fisikokimia tanah dan stabilitas kontaminan.

2.5 Parameter Penelitian

Evaluasi efektivitas *biochar* komposit dalam memperbaiki kualitas tanah dan meremediasi lahan tercemar Timbal (Pb) didasarkan pada pengukuran sejumlah parameter kunci yang merepresentasikan perubahan sifat fisikokimia tanah serta stabilitas kontaminan. Pemilihan parameter ini mengacu pada indikator kesehatan tanah (*soil health indicators*) dan mekanisme imobilisasi logam berat yang relevan secara ilmiah.

2.5.1 Karakteristik Fisikokimia *Biochar*

Karakterisasi fisikokimia dasar *biochar* merupakan tahap penapisan (*screening*) awal yang fundamental untuk mengetahui kualitas material sebelum ditambahkan ke media tanah. Pada tahap ini, evaluasi difokuskan pada efisiensi konversi termal, stabilitas karbon, serta sifat kimia dasar yang menentukan kinerja agronomis dan lingkungan dari *biochar* sebagai bahan remediasi tanah.

Parameter utama yang dievaluasi meliputi rendemen (*yield*) dan analisis proksimat, yang mencakup kadar abu, zat terbang (*volatile matter*), dan karbon tetap (*fixed carbon*). Kuncara dkk. (2024) menjelaskan bahwa parameter-parameter tersebut sangat dipengaruhi oleh suhu *pyrolysis*, di mana peningkatan suhu secara konsisten menurunkan *volatile matter* dan meningkatkan fraksi karbon tetap. Tingginya kandungan karbon tetap menjadi indikator penting bahwa *biochar* memiliki struktur karbon yang stabil (*recalcitrant*) dan tahan terhadap degradasi biologis, sehingga berpotensi berfungsi sebagai penyimpan karbon jangka panjang di dalam tanah Zafeer dkk. (2024). Selain itu, berkurangnya zat terbang juga mengindikasikan terbukanya struktur pori yang sebelumnya tertutup oleh senyawa volatil, yang berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas retensi air dan aerasi tanah.

Selain stabilitas fisik, sifat kimia dasar *biochar* dievaluasi melalui pengukuran derajat keasaman (pH) dan *electrical conductivity* (EC). *Biochar* hasil *pyrolysis* umumnya bersifat alkalis akibat akumulasi mineral basa serta hilangnya gugus asam organik selama proses pemanasan. Wigan (2023) melaporkan bahwa sifat alkalis ini memberikan keuntungan ganda, yaitu berfungsi sebagai agen pengapuran (*liming agent*) yang efektif untuk

meningkatkan pH tanah masam, serta mendukung proses presipitasi dan imobilisasi logam berat melalui pembentukan senyawa hidroksida atau karbonat yang kurang larut. Sementara itu, nilai EC digunakan sebagai indikator kandungan garam terlarut dan mineral anorganik dalam *biochar*, yang penting untuk memastikan bahwa aplikasi material tidak menimbulkan risiko salinitas berlebih pada tanah.

Dengan demikian, karakteristik fisikokimia dasar *biochar* komposit pada tahap ini digunakan sebagai dasar seleksi awal untuk menentukan material yang paling stabil, aman, dan potensial sebelum dilakukan pengujian lanjutan pada media tanah tercemar.

2.5.2 Derajat Keasaman (pH) Tanah

Derajat keasaman (pH) tanah merupakan variabel yang mengendalikan kelarutan, spesiasi, dan mobilitas logam berat di dalam tanah. Rolka dkk. (2023) menjelaskan bahwa pada kondisi tanah masam ($\text{pH} < 5,5$), ion H^+ berkompetisi dengan kation logam pada situs pertukaran kation, sehingga meningkatkan kelarutan dan fitotoksisitas Timbal (Pb). Peningkatan pH tanah setelah penambahan *biochar* digunakan sebagai indikator awal keberhasilan remediasi, karena kenaikan pH memicu deprotonasi gugus fungsi permukaan, meningkatkan muatan negatif koloid, serta mendorong presipitasi dan stabilisasi logam (S. Wei dkk., 2019). Target perbaikan pH dalam penelitian ini adalah kisaran netral (6,0–7,0) optimal bagi ketersediaan hara dan imobilisasi Pb.

2.5.3 Berat Isi (*Bulk density*) dan Porositas Total Tanah

Berat isi (*Bulk Density*) dan porositas total merupakan indikator fundamental dalam mengevaluasi pemulihan struktur fisik tanah yang terdegradasi. Secara agronomis, tanah pertanian yang produktif idealnya memiliki nilai *Bulk Density* $< 1,3 \text{ g/cm}^3$, sedangkan nilai $> 1,6 \text{ g/cm}^3$ mengindikasikan kondisi pemadatan parah (*soil compaction*) yang menghambat penetrasi akar serta sirkulasi udara tanah (Wu dkk., 2022). Perubahan densitas tanah akibat perlakuan *biochar* dievaluasi mengikuti prosedur standar ASTM D7263 (*Standard Test Methods for Laboratory*

Determination of Density of Soil Specimens) untuk menjamin akurasi pengukuran pada kondisi kepadatan yang terkontrol.

Penambahan *biochar* menurunkan kepadatan tanah melalui dua mekanisme utama. Mekanisme pertama adalah efek pengenceran fisik (*physical dilution effect*), di mana *biochar* yang memiliki densitas rendah ($< 0,6 \text{ g/cm}^3$) dan struktur berpori tinggi, ketika dicampurkan ke dalam matriks tanah mineral yang lebih padat, secara langsung menurunkan berat isi tanah per satuan volume. Al-zyoud dkk. (2026) menegaskan bahwa kontribusi material karbon ringan ini berperan signifikan dalam mereduksi densitas tanah tanpa mengganggu kestabilan struktur.

Mekanisme kedua, yang berperan penting dalam perbaikan jangka panjang, adalah pembentukan dan stabilisasi agregat tanah. Moradi-choghamarani dkk. (2024) melaporkan bahwa *biochar* berbasis *bagasse* (*bagasse*) berfungsi sebagai inti pengikat (*nucleation sites*) yang memfasilitasi pembentukan agregat tanah yang lebih stabil. Proses agregasi ini secara langsung meningkatkan porositas total serta proporsi pori makro (*macropores*), yang dihitung berdasarkan data berat jenis partikel (*specific gravity*) sesuai standar ASTM D854.

Peningkatan porositas total tanah memberikan implikasi hidrologis yang signifikan terhadap kemampuan tanah dalam mengelola air. Struktur tanah dengan ruang pori yang lebih berkembang memungkinkan distribusi air dan udara berlangsung lebih efisien di dalam matriks tanah. Secara fisik, nilai porositas yang tinggi mengindikasikan peningkatan proporsi makropori yang berperan sebagai jalur aliran utama bagi pergerakan air secara vertikal.

Berdasarkan hasil analisis, penambahan *biochar* terbukti meningkatkan total ruang pori tanah secara keseluruhan. Peningkatan ini tidak hanya bersifat kuantitatif, tetapi juga berkaitan dengan perubahan distribusi ukuran pori yang lebih mendukung aliran air. Secara teoritis, kondisi tersebut berkontribusi pada percepatan infiltrasi air ke lapisan tanah yang lebih dalam, sehingga mampu menekan potensi limpasan permukaan (*runoff*) serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan air di dalam tanah.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Jamilatun dkk., 2022 dan Moradi-choghamarani dkk., 2024 yang menunjukkan bahwa penambahan *biochar*, khususnya berbasis biomassa lignoselulosa, berperan dalam memperbaiki struktur agregat tanah dan meningkatkan konektivitas pori. Dengan demikian, peningkatan porositas akibat penambahan *biochar* dapat diinterpretasikan sebagai indikator pemulihan fungsi hidrologis pada tanah yang mengalami degradasi fisik atau pemadatan.

2.5.4 Keberadaan Hayati Fraksi Timbal (Pb)

Dalam studi remediasi tanah, analisis konsentrasi logam total menggunakan asam kuat sering kali dianggap kurang relevan karena tidak merepresentasikan risiko aktual terhadap tanaman (Houba dkk., 2000; Kumar & Bhattacharya, 2021). Sebagian besar logam dalam tanah terikat kuat pada kisi mineral dan bersifat inert. Oleh karena itu, penelitian ini memfokuskan evaluasi pada keberadaan hayati (*bioavailability*), yaitu fraksi logam yang aktif bergerak di larutan tanah dan berpotensi diserap oleh akar (Samsuri dkk., 2020).

Prosedur evaluasi keberadaan hayati timbal (Pb) dilakukan mengacu pada Metode Houba dkk. (2000) (Houba Method) menggunakan larutan pengestrak Kalsium Klorida (CaCl_2) 0,01 M. Metode ini dipilih karena memiliki kekuatan ionik (*ionic strength*) yang mendekati kondisi alami larutan tanah pada lahan pertanian. Berbeda dengan metode ekstraksi air atau asam kuat, Metode Houba dirancang untuk mensimulasikan proses desorpsi logam yang terjadi secara alami di zona perakaran, sehingga mampu memberikan estimasi keberadaan hayati logam yang lebih representatif serta berkorelasi linier dengan serapan tanaman.

Prinsip pengujian ini adalah mengukur konsentrasi Pb yang berada pada fraksi *exchangeable* (mudah dipertukarkan), yaitu fraksi logam yang paling mobile dan berpotensi toksik. Keberhasilan penambahan *biochar* dinilai dari penurunan signifikan konsentrasi Pb yang terekstrak menggunakan Metode Houba dibandingkan dengan tanah kontrol. Imran dkk. (2025) menjelaskan bahwa penurunan fraksi *exchangeable* mencerminkan terjadinya transformasi kimiawi, di mana ion Pb yang sebelumnya mobile bereaksi

dengan fosfat dari *biochar* berbasis lumpur membentuk mineral stabil seperti pyromorphite, atau terperangkap secara kuat dalam matriks aromatik *biochar* sebagai bagian dari fraksi residu.

Dengan demikian, rendahnya konsentrasi Pb yang terdeteksi melalui Metode Houba setelah periode inkubasi mengonfirmasi bahwa mekanisme remediasi yang terjadi bukan sekadar adsorpsi sementara, melainkan stabilisasi in-situ yang bersifat jangka panjang. Proses ini secara efektif memutus jalur masuk logam berat ke dalam sistem biologis dan menurunkan risiko ekologis pada tanah tercemar Oksanen dkk. (2023).

2.5.5 Korelasi Karakteristik *Biochar* terhadap Remediasi Pb

Efektivitas remediasi logam berat Timbal (Pb) pada tanah sangat bergantung pada sifat intrinsik material *biochar* yang diaplikasikan (Guo dkk., 2020; Imran dkk., 2025). Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi berjenjang untuk memahami korelasi antara karakteristik *biochar* dengan kinerja imobilisasi Pb. Pengujian dilakukan melalui alur aplikasi variasi *biochar* ke tanah tercemar dan inkubasi selama 28 hari, penentuan efektivitas penurunan Pb menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk memilih variasi *biochar* terbaik dan terburuk, serta analisis lanjutan menggunakan FTIR dan SEM-EDX pada *biochar* murni dan campuran tanah-*biochar* untuk mengungkap mekanisme molekuler dan visual di balik performa masing-masing *biochar* (Hassan dkk., 2020; Kumar dkk., 2021; S. Wei dkk., 2019)

2.5.5.1 Karakteristik Gugus Fungsi *Biochar*

Analisis gugus fungsi menggunakan FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi situs aktif pada permukaan *biochar* yang berperan dalam mekanisme pengikatan Pb. Berdasarkan pustaka, gugus fungsi permukaan seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan ikatan aromatik C=C merupakan komponen krusial yang terlibat dalam reaksi kompleksasi dan pertukaran ion dengan kation logam berat (Cao dkk., 2024; Pelleri dkk., 2021).

Pada pengujian *biochar* murni, analisis ini dilakukan untuk memetakan potensi situs aktif bawaan sebelum berinteraksi dengan tanah. Perbandingan profil FTIR antara *biochar* dengan performa terbaik dan terburuk

memberikan wawasan mengenai keterlibatan gugus fungsi tersebut dalam proses imobilisasi (Mohamed dkk., 2023). Sementara itu, pergeseran (*shifting*) atau perubahan intensitas pada puncak serapan gugus fungsi pasca inkubasi 28 hari pada sampel campuran tanah *biochar* menjadi bukti molekuler terjadinya mekanisme stabilisasi kimiawi antara *biochar* dan ion Pb di dalam matriks tanah (S. Wei dkk., 2019).

2.5.5.2 Karakteristik Permukaan dan Sebaran Mineral *Biochar*

Analisis permukaan *biochar* menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengevaluasi perkembangan struktur pori serta perubahan morfologi yang dipicu oleh perbedaan bahan baku dan perlakuan *pyrolysis*. Struktur pori yang terbentuk menjadi faktor penentu dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi fisik, ruang retensi kontaminan, dan situs pembentukan presipitat logam pada permukaan material (Moradi-choghamarani dkk., 2024). Analisis *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) diterapkan untuk mengidentifikasi komposisi unsur dan memetakan sebaran mineral pada *biochar* serta distribusi Pb pada matriks tanah yang terremediasi (S. Chen dkk., 2024; Wu dkk., 2022).

Karakteristik pori *biochar* dianalisis secara kuantitatif melalui citra SEM menggunakan perangkat lunak ImageJ. Analisis citra dua dimensi (2D) mencakup estimasi porositas area serta evaluasi morfologi pori yang meliputi jumlah (*count*), luas pori total (*total area*), luas pori rata-rata (*average size*), persentase area pori (%Area), *circularity*, *solidity*, dan diameter Feret (*Feret diameter*). Parameter-parameter tersebut menjelaskan hubungan antara evolusi struktur pori dengan efisiensi adsorpsi dan imobilisasi logam berat oleh *biochar* (Leng dkk., 2021; Srocke dkk., 2021).

Persentase area pori (%Area) menjadi estimasi porositas permukaan *biochar* yang dihitung melalui perbandingan luas area pori terhadap total luas bidang pengamatan:

$$\text{Porositas Area (\%)} = \frac{\text{Luas Area Pori}}{\text{Luas Total Bidang Pengamatan}} \times 100 \quad (2.6)$$

Keterangan:

Porositas Area (%) : persentase area pori terhadap total bidang pengamatan SEM (%)

Luas Area Pori : total luas pori yang terdeteksi pada citra SEM (μm^2)

Luas Total Bidang Pengamatan : luas keseluruhan area citra SEM yang dianalisis (μm^2)

Selain itu, parameter *circularity* digunakan untuk mengevaluasi tingkat kebulatan pori, sedangkan *solidity* digunakan untuk menggambarkan tingkat kekonkavan dan kompleksitas morfologi pori. Diameter Feret digunakan untuk merepresentasikan dimensi maksimum pori yang terdeteksi. Seluruh parameter morfometrik tersebut kemudian dikorelasikan dengan karakteristik fisikokimia *biochar* dan efektivitas imobilisasi Pb untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi fisik, retensi kontaminan, dan pembentukan presipitat pada permukaan *biochar* (Chaudhary dkk., 2024; Mohamed dkk., 2023).

2.6 Analisis Data Statistik

Analisis statistik dalam penelitian ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan terhadap karakteristik fisikokimia *biochar* secara kuantitatif. Seluruh data disajikan dalam bentuk nilai rata-rata (*mean*) dan simpangan baku (*standard deviation*) pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Sebelum analisis parametrik dilakukan, data terlebih dahulu diuji normalitas dan homogenitas varians untuk memastikan kelayakan penerapan model statistik multivariat. Pengujian homogenitas dilakukan menggunakan *Levene's Test* pada masing-masing variabel terikat (Adebayo & Loko, 2024; He dkk., 2024). Apabila asumsi homogenitas tidak sepenuhnya terpenuhi, interpretasi hasil multivariat diprioritaskan menggunakan statistik *Pillai's Trace* yang lebih robust terhadap pelanggaran homogenitas pada rancangan percobaan seimbang (*balanced design*) (Ergin & Koşkan, 2024).

2.6.1 Analisis Karakteristik *Biochar*.

Karakterisasi intrinsik *biochar* melibatkan evaluasi parameter proksimat yang meliputi kadar air, kadar abu, zat terbang (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), serta sifat kimia dasar berupa pH dan *electrical conductivity* (EC). Pengujian ditujukan untuk mengidentifikasi pengaruh faktor jenis bahan baku (tunggal maupun komposit ko-*pyrolysis*) dan suhu konversi termal, beserta interaksi nyata antara kedua variabel bebas tersebut. Penerapan metode statistik parametrik berupa *Two-Way* MANOVA memfasilitasi deteksi efek sinergis termokimia secara simultan terhadap variasi karakteristik fisikokimia material (Pellera dkk., 2021; Veiga dkk., 2021).

Studi menunjukkan bahwa karakteristik *biochar* sangat dipengaruhi oleh parameter operasional *pyrolysis*, di mana suhu tinggi cenderung meningkatkan stabilitas karbon (*fixed carbon*) sementara jenis bahan baku menentukan komposisi mineral dan gugus fungsi permukaan (Paz-Ferreiro dkk., 2018; Zafeer dkk., 2024). Penggunaan statistik multivariat pada tahap ini sangat penting untuk membuktikan secara kuantitatif kombinasi perlakuan mana yang menghasilkan *biochar* dengan kualitas paling optimal bagi tujuan remediasi (Hadey dkk., 2022; Mohamed dkk., 2023).

2.6.2 Analisis Perubahan Sifat Tanah dan Penurunan Pb

Karakterisasi *biochar* dilakukan melalui pengujian kadar air, kadar abu, *volatile matter*, *fixed carbon*, derajat keasaman (pH), dan *electrical conductivity* (EC). Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jenis bahan baku, suhu *pyrolysis*, serta interaksi kedua faktor terhadap kualitas *biochar* yang dihasilkan. Analisis dilakukan menggunakan *Two-Way Multivariate Analysis of Variance (Two-Way MANOVA)* sehingga pengaruh perlakuan terhadap seluruh parameter dapat dievaluasi secara simultan dalam satu model statistik (Pellera dkk., 2021; Veiga dkk., 2021).

Apabila hasil pengujian multivariat menunjukkan pengaruh yang signifikan, interpretasi dilanjutkan menggunakan uji univariat *Tests of Between-Subjects Effects* untuk mengidentifikasi parameter yang dipengaruhi

secara nyata oleh masing-masing faktor perlakuan maupun interaksi keduanya. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap perubahan karakteristik fisikokimia *biochar* akibat variasi bahan baku dan suhu *pyrolysis* (Hadey dkk., 2022; Mohamed dkk., 2023). Selanjutnya, hasil karakterisasi digunakan sebagai dasar dalam analisis multikriteria berbobot (*weighted multi-criteria assessment*) untuk menentukan *biochar* dengan performa terbaik sebagai kandidat remediasi pada tahap remediasi tanah.

2.7 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *biochar* berbasis *sludge* dan biomassa lignoselulosa memiliki potensi besar sebagai pembenah tanah dan agen stabilisasi logam berat. Namun, sebagian besar studi masih terbatas pada material tunggal atau kombinasi sederhana, serta belum mengintegrasikan pendekatan *co-pyrolysis* multi limbah lokal dan penambahannya secara langsung pada tanah tercemar. Oleh karena itu, Tabel 2. 6 Perbandingan Penelitian Terdahulu disusun untuk memetakan temuan utama penelitian sebelumnya sekaligus menegaskan celah penelitian yang menjadi dasar kebaruan studi ini.

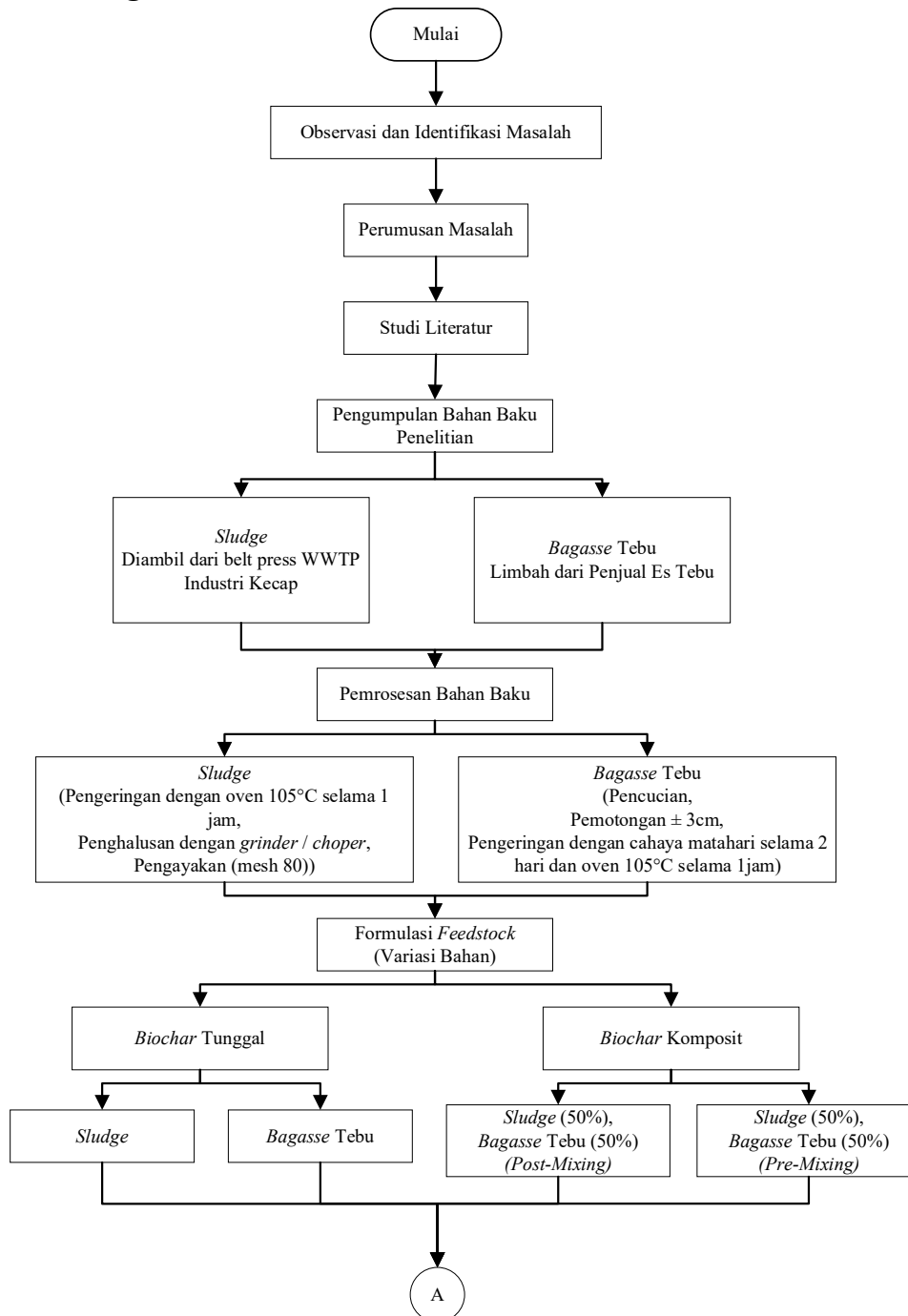
Tabel 2. 6 Perbandingan Penelitian Terdahulu

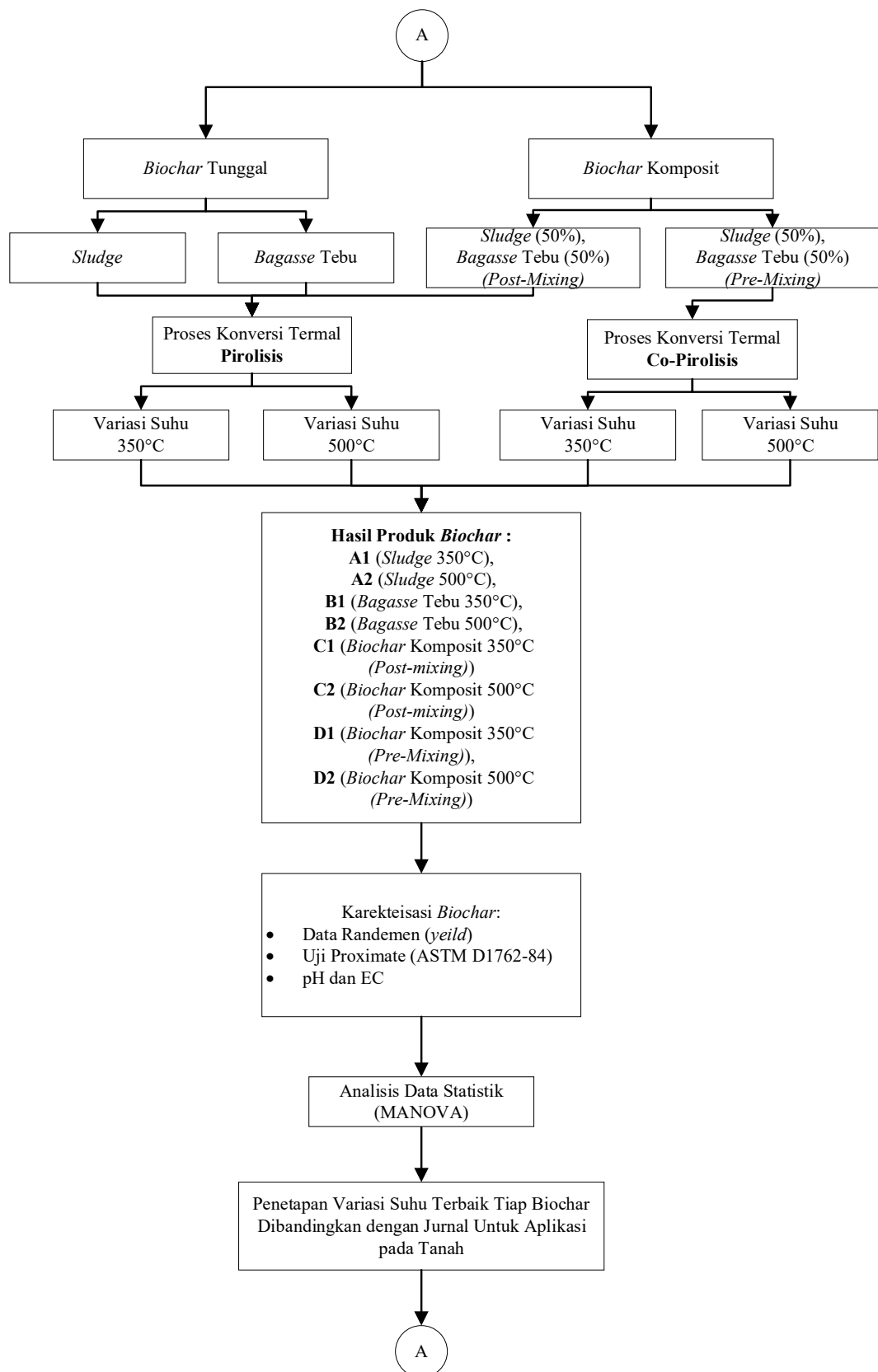
No	Peneliti & Tahun	Judul / Fokus Penelitian	Metode & Variabel yang Diuji	Hasil Utama / Temuan	Gap Penelitian (Kebaruan Penelitian Ini)
1	Wigan (2023)	Impact of <i>Biochar</i> Application on Soil Properties	<i>Biochar Mud Press</i> (Lumpur Gula) + <i>Corn Cob</i>	Meningkatkan pH, C-Organik, dan Ketersediaan Fosfor	Menggunakan kombinasi Lumpur Kecap dan <i>Bagasse</i> , serta fokus pada mekanisme remediasi Pb (bukan hanya kesuburan).
2	Tarelho dkk. (2019)	<i>Biochar</i> from slow pyrolysis of biological <i>sludge</i>	<i>Pyrolysis sludge</i> biologis pada suhu 300–600°C	<i>Biochar sludge</i> meningkatkan pH tanah dan CEC	Fokus pada sistem campuran biner dengan <i>bagasse</i> tebu untuk optimasi pori.
3	Al-zyoud dkk. (2026)	Effects of physical properties on heavy metal adsorption	Review pengaruh sifat fisik <i>biochar</i> thd adsorpsi	Luas permukaan (SSA) dan pori berkorelasi positif dengan adsorpsi logam	Melakukan validasi eksperimental hubungan antara SSA <i>biochar</i> komposit dengan efisiensi stabilisasi Pb pada tanah.
5	Sajdak dkk. (2023)	Sewage <i>sludge</i> char in CO ₂ sequestration	Kajian kemampuan <i>biochar sludge</i> menyerap karbon	<i>Biochar sludge</i> mampu menyimpan karbon aromatik stabil	Mengaitkan perbaikan struktur fisik tanah dan imobilisasi Pb secara simultan.
8	Zafeer dkk. (2024)	Sugarcane <i>bagasse</i> -based <i>biochar</i> review	Review karakteristik dan aplikasi <i>bagasse biochar</i>	<i>Bagasse biochar</i> meningkatkan porositas dan retensi air tanah	Melakukan pengujian eksperimental pada tanah yang tercemar logam berat Pb.
9	Moradi-choghamarani dkk. (2024)	Sugarcane <i>bagasse</i> to improve soil physics	Uji <i>biochar bagasse</i> terhadap sifat fisik tanah	<i>Biochar bagasse</i> memperbaiki stabilitas agregat dan porositas tanah	Menguji interaksi lumpur industri kecap dan <i>bagasse</i> sebagai remediasi tanah.

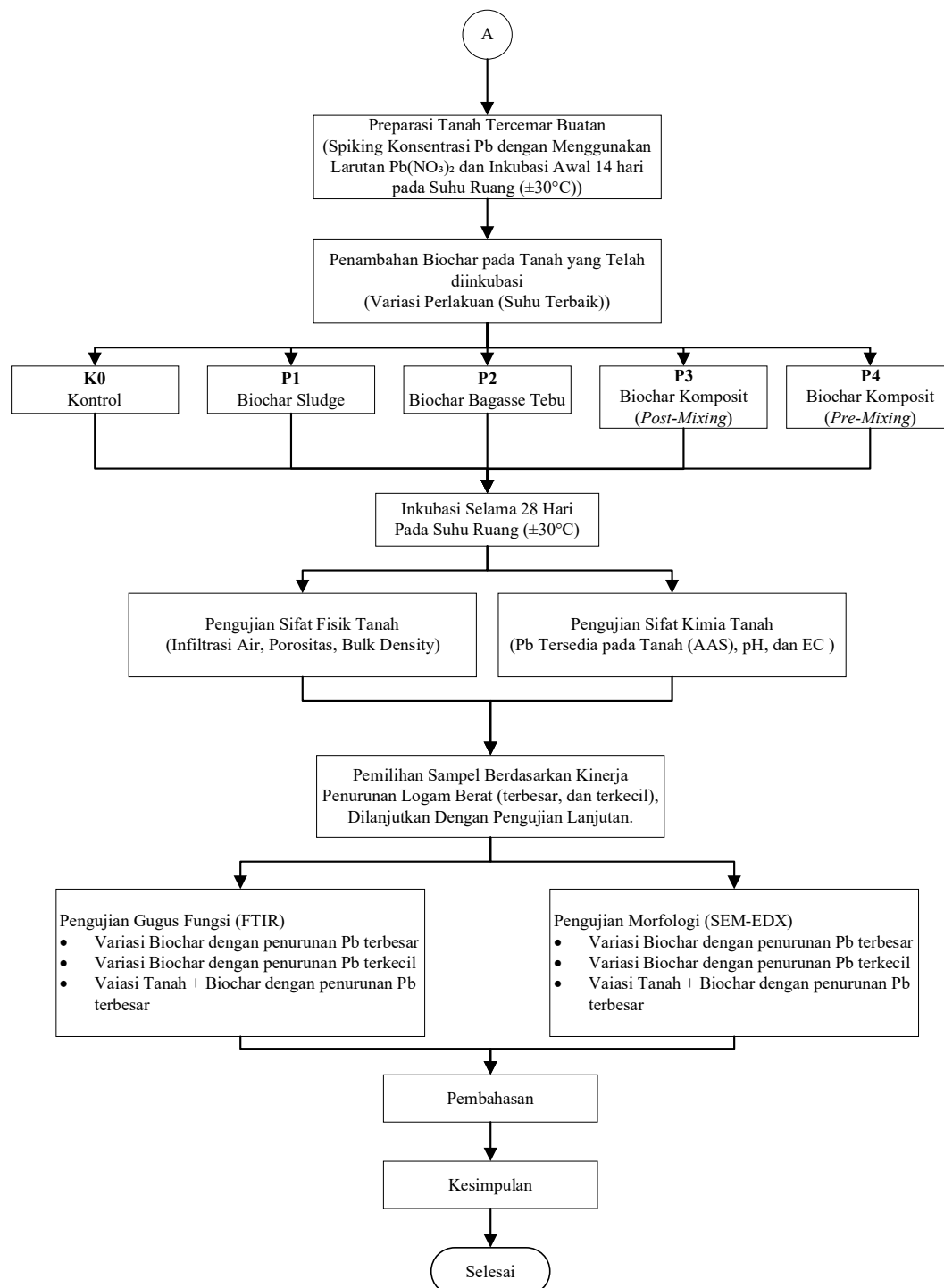
No	Peneliti & Tahun	Judul / Fokus Penelitian	Metode & Variabel yang Diuji	Hasil Utama / Temuan	Gap Penelitian (Kebaruan Penelitian Ini)
15	J. Zhang dkk. (2020))	<i>Biochar</i> with high aromaticity & low metal mobility	Analisis aromatisitas dan mobilitas logam	Biomassa meningkatkan aromatisitas yang efektif mengunci logam	Menggunakan <i>bagasse</i> untuk meningkatkan aromatisitas <i>biochar</i> lumpur.
19	Y. Wei dkk. (2025)	In-situ stabilization of heavy metals	Klasifikasi <i>biochar</i> sebagai matriks penjebak logam	<i>Biochar</i> berperan sebagai immobilizing matrix melalui interaksi fisik-kimia	Fokus pada mekanisme penjebakan Pb dalam pori <i>biochar bagasse</i> .
20	Jamilatun dkk. (2022)	Porositas total dan sirkulasi udara tanah	Uji perbaikan struktur fisik tanah pasca <i>biochar</i>	Peningkatan porositas memperbaiki sirkulasi udara di zona perakaran	Mengukur perbaikan porositas pada tanah masam pasca aplikasi komposit.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian







3.2 Identifikasi Masalah

Aktivitas industri pengolahan pangan dan usaha skala kecil menghasilkan limbah organik yang belum terkelola secara optimal. Lumpur (*sludge*) dari IPAL industri kecap terus terakumulasi dengan karakteristik kadar air dan fraksi volatil tinggi, sehingga berisiko mencemari lingkungan apabila

ditambahkan langsung ke tanah karena kandungan senyawa organik aktif (Li dkk., 2025; Tarelho dkk., 2019). Di sisi lain, UMKM penjual es tebu menghasilkan limbah *bagasse* (*bagasse*) yang umumnya dibuang, meskipun memiliki potensi sebagai prekursor material karbon berpori (Zafeer dkk., 2024). Pengolahan kedua limbah ini secara terpisah menghasilkan *biochar* dengan keterbatasan masing-masing, yaitu *biochar sludge* yang cenderung padat dan *biochar bagasse* yang miskin mineral pengikat logam (Pellera dkk., 2021), sehingga efektivitas remediasi logam berat Timbal (Pb) masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan *co-pyrolysis sludge* dan *bagasse* untuk menghasilkan *biochar* komposit dengan keseimbangan sifat fisik dan kimia yang lebih stabil guna meningkatkan imobilisasi Pb dalam tanah tercemar (Y. Wei dkk., 2025).

3.3 Penentuan Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada analisis karakteristik fisikokimia bahan baku *sludge* dan *bagasse*, serta pengaruh variasi komposisi dan suhu *pyrolysis* (350 °C dan 500 °C) terhadap kualitas *biochar* tunggal maupun komposit. Pemilihan suhu 350 °C bertujuan mempertahankan gugus fungsi oksigenat (Hassan dkk., 2020), sedangkan suhu 500 °C digunakan untuk mengoptimalkan struktur pori dan stabilitas material (Hadey dkk., 2022; J. Zhang dkk., 2020). Evaluasi karakteristik ini ditujukan untuk menentukan formulasi material yang stabil sebagai kandidat agen remediasi.

Selanjutnya, penelitian ini juga menganalisis efektivitas penambahan *biochar* terpilih terhadap perbaikan matriks tanah tercemar buatan. Evaluasi mencakup pengaruh remediasi terhadap perubahan sifat fisik dan hidrologis, khususnya peningkatan porositas total (B. Wei dkk., 2023), beserta modifikasi sifat kimia tanah. Secara khusus, penelitian mengkaji bagaimana karakteristik bawaan *biochar* berperan dalam mekanisme stabilisasi *in-situ* guna menekan bioavailabilitas dan mengimobilisasi logam berat Timbal (Pb) pada lahan terdegradasi (Guo dkk., 2020; Y. Wei dkk., 2025).

3.4 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh dasar ilmiah dan parameter teknis sebagai landasan penelitian. Kajian dilakukan terhadap jurnal ilmiah, buku

teks, serta dokumen standar yang relevan dengan karakteristik lumpur biologis industri pengolahan pangan, *bagasse* (*bagasse*), serta proses *pyrolysis* dan *co-pyrolysis*. Literatur juga digunakan untuk mengkaji pengaruh suhu *pyrolysis* terhadap karakteristik *biochar* serta mekanisme interaksi *biochar* dengan tanah tercemar timbal (Pb), meliputi adsorpsi, pertukaran ion, dan imobilisasi logam.

Hasil kajian menunjukkan bahwa penelitian mengenai *biochar sludge* dan *biochar bagasse* masih banyak dilakukan secara terpisah dan umumnya berfokus pada karakteristik material. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi *biochar* komposit hasil *co-pyrolysis sludge–bagasse* sebagai remediasi tanah yang berpotensi memperbaiki sifat tanah sekaligus menurunkan ketersediaan Pb.

3.5 Ruang Lingkup

3.5.1 Waktu Penelitian

Penelitian ini direncanakan berlangsung selama 5 bulan terhitung mulai dari bulan Januari hingga Juli tahun 2026. Alokasi waktu tersebut dibagi ke dalam empat tahapan utama, yaitu: Preparasi dan karakterisasi bahan baku, Produksi dan optimasi *biochar* komposit, penambahan *biochar* dan inkubasi pada tanah tercemar buatan, serta analisis data dan penyusunan laporan.

3.5.2 Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di beberapa lokasi yang berbeda disesuaikan dengan tahapan kerja dan ketersediaan instrumen pengujian, meliputi:

1. Lokasi Pengambilan Sampel (*sampling*) :

- a. Lumpur Limbah (*Sludge*): Diambil dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Kecap di Pasuruan.
- b. *Bagasse* (*Bagasse*) : Diambil dari UMKM penjual es tebu di Surabaya.
- c. Tanah : Sampel tanah diambil dari lahan pertanian di Banyuwangi.

2. Lokasi Preparasi : Proses preparasi bahan baku (pengeringan, penggilingan, pengayakan) dilaksanakan di Laboratorium Limbah dan Rumah Kompos Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
3. Lokasi Produksi : Proses karbonisasi menggunakan reaktor *pyrolysis* (*muffle furnace*) dilaksanakan di Politeknik Negeri Malang.
4. Lokasi Pengujian dan Karakterisasi :
 - a) Uji karakteristik *biochar* (Proksimat, pH, Kadar Air) : Dilakukan di Laboratorium Limbah Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
 - b) Analisis Morfologi (SEM-EDX) dan Gugus Fungsi (FTIR) : Dilakukan di Laboratorium Material Institut Sepuluh Nopember Surabaya.
 - c) Uji Kadar Logam Berat (AAS) : Dilakukan di Laboratorium Material Institut Sepuluh Nopember Surabaya.

3.6 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data secara sistematis untuk menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan penelitian. Data yang dikumpulkan diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder.

3.6.1 Data Primer

Data primer merupakan data yang diperoleh secara langsung melalui kegiatan eksperimen di laboratorium dan pengujian penambahan *biochar* pada media tanah tercemar buatan. Data primer dalam penelitian ini diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok utama, yaitu data karakteristik awal *biochar*, data sifat fisik dan kimia tanah setelah aplikasi, serta data validasi mekanisme imobilisasi logam berat, dengan rincian sebagai berikut :

1. Karakteristik Fisikokimia *Biochar* (Tunggal & Komposit):

Karakteristik awal *biochar* dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh variasi bahan baku dan suhu *pyrolysis* terhadap kualitas material sebelum diaplikasikan ke tanah. Parameter yang diamati meliputi :

- a) Data randemen (*yield*) produksi (SNI: SNI 06-6989.11-2004),

- b) Nilai derajat keasaman (pH) dan *Electrical conductivity* (EC) (SNI: SNI 06-6989.11-2004 dan SNI: SNI 06-6989.1-2004),
 - c) Uji proksimat (kadar air, kadar abu, *volatile matter*, dan karbon tetap) (ASTM D3172–D3175),
 - d) Data skoring dan seleksi *biochar* berdasarkan metode *Weighted Multi-Criteria Biochar*.
2. Sifat Fisik Tanah :
- a) Data densitas tanah (*Bulk density*) (ISO 7837:1992 (*Determination of bulk density (loose)*)).
 - b) Berat Jenis Partikel (*Specific Gravity*) (ASTM D854).
 - c) Presentase porositas total tanah (SNI: SNI 06-6989.54-2005).
3. Efektivitas Remediasi :
- a) Konsentrasi logam berat Timbal (Pb) pada tanah setelah perlakuan.
 - Preparasi Sampel : SNI 06-6989.54-2005
 - Metode Ekstraksi : Ekstraksi tunggal (*Single Extraction*) menggunakan larutan CaCl_2 10.01 M dengan rasio tanah : pelarut 1:10 (b/v) Metode Houba (Houba dkk., 2000).
 - Analisis Pb menggunakan AAS : SNI 6989.46:2009
 - Acuan baku mutu : PP No. 22 Tahun 2021
 - b) Pengujian lanjutan terhadap sampel terpilih dengan efektivitas remediasi terburuk, dan terbaik, yang meliputi :
 - Analisis morfologi permukaan dan struktur pori *biochar* dan tanah menggunakan SEM (ASTM E986)
 - Analisis sebaran unsur mineral menggunakan EDX (ASTM E1252)
 - Analisis gugus fungsi senyawa organik/anorganik secara kualitatif dan kuantitatif dengan mengukur penyerapan radiasi inframerah pada *biochar* dan tanah menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infrared*)
 - Perhitungan estimasi luas permukaan spesifik berbasis citra menggunakan perangkat lunak ImageJ

3.6.2 Data Sekunder

Data sekunder diperoleh melalui studi literatur yang bersumber dari jurnal ilmiah bereputasi, buku teks, laporan penelitian terdahulu, serta dokumen standar mutu nasional dan internasional yang relevan. Data tersebut digunakan sebagai informasi pendukung dalam perancangan penelitian, analisis hasil, dan evaluasi kinerja material yang dihasilkan.

Data sekunder dimanfaatkan untuk memperoleh informasi mengenai karakteristik awal sludge industri pengolahan pangan dan *bagasse* (*bagasse*), mekanisme *co-pyrolysis* dan pembentukan *biochar* komposit, serta standar mutu *biochar* dan pembenah tanah yang berlaku. Selain itu, data tersebut digunakan sebagai acuan dalam pembahasan hasil penelitian melalui perbandingan dengan temuan pada penelitian terdahulu yang relevan.

3.7 Variabel Penelitian

3.7.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang dimanipulasi atau diubah-ubah untuk mengetahui pengaruhnya terhadap variabel terikat. Dalam penelitian ini, variabel bebas terdiri dari :

1. Jenis Material Remediasi (Faktor A) : Variasi bahan yang digunakan untuk mengetahui pengaruh komposisi tunggal dibandingkan dengan komposit.
2. Suhu *Pyrolysis* (Faktor B) : Variasi suhu diterapkan pada proses produksi *biochar* guna menyeleksi satu suhu optimum berdasarkan stabilitas karbon.
3. Metode Pembuatan *Biochar* Komposit (Faktor C) : variasi metode pencampuran bahan dalam pembentukan *biochar* komposit, meliputi metode *pyrolysis* terpisah (post-mixing), yaitu pencampuran *biochar* *sludge* dan *bagasse* setelah proses *pyrolysis*, serta metode *co-pyrolysis* (pre-mixing), yaitu pencampuran bahan sebelum proses konversi termal berlangsung.

Tabel 3. 1 Rancangan Produksi dan Kode Sampel *Biochar*

Metode	Bahan	Perbandingan Komposisi Bahan (% b/b)	Suhu Konversi Termal			
			350°C Selama 60 menit		500°C Selama 60 menit	
<i>Pyrolysis</i>	Lumpur Limbah (<i>Sludge</i>)	100 b/b	A1	A1*	A2	A2*
	<i>Bagasse</i> (<i>Bagasse</i>)	100 b/b	B1	B1*	B2	B2*
	<i>Sludge + Bagasse</i> (<i>Post-Mixing</i>)	50 : 50 b/b	C1	C1*	C2	C2*
<i>Co-pyrolysis</i>	<i>Sludge + Bagasse</i> (<i>Pre-Mixing</i>)	50 : 50 b/b	D1	D1*	D2	D2*
Total			16			

*: Sampel Duplo

Tabel 3. 1 menyajikan rancangan produksi *biochar* tunggal dan *biochar* komposit yang dihasilkan melalui proses *pyrolysis* dan *co-pyrolysis* dengan variasi komposisi bahan baku serta suhu operasi. Rancangan ini digunakan untuk memperoleh berbagai kandidat *biochar* yang kemudian dikarakterisasi secara fisikokimia guna menentukan satu suhu *pyrolysis* terbaik berdasarkan stabilitas karbon, struktur pori, serta reaktivitas permukaan.

Berdasarkan hasil seleksi tersebut, *biochar* terpilih selanjutnya diaplikasikan sebagai bahan remediasi tanah pada tahap pengujian sifat fisik tanah dan efektivitas remediasi logam berat. Rancangan perlakuan aplikasi *biochar* ke dalam tanah ditampilkan pada tabel berikutnya, yang memuat kode perlakuan, jenis *biochar* terpilih, dosis aplikasi, serta jumlah replikasi sebagai dasar pengujian eksperimental pada skala laboratorium.

Tabel 3. 2 Rancangan Perlakuan dan Kode Sampel Remediasi

Kode Sampel	Perlakuan (<i>remediasit</i>)	Sumber <i>Biochar</i> /Bahan	Dosis Aplikasi (% b/b)	Replikasi
K0	Tanah Tanpa Perlakuan	-	0%	2
P1	<i>Biochar Sludge</i> (<i>Pyrolysis</i>)	Produk P1-Ax (suhu terpilih)	5% b/b	2
P2	<i>Biochar Bagasse</i> (<i>Pyrolysis</i>)	Produk P2-Bx (suhu terpilih)	5% b/b	2

Kode Sampel	Perlakuan (<i>remediasi</i>)	Sumber <i>Biochar</i> /Bahan	Dosis Aplikasi (% b/b)	Replikasi
P3	<i>Biochar</i> Komposit (<i>Pyrolysis</i>) (<i>Post-Mixing</i>)	Produk P3-Cx (suhu terpilih)	5% b/b	2
P4	<i>Biochar</i> Komposit (<i>Co-pyrolysis</i>) (<i>Pre-Mixing</i>)	Produk P4-Dx (suhu terpilih)	5% b/b	2
Total Perlakuan				10

x : Merupakan *biochar* dari Suhu Terpilih

3.7.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang diukur atau diamati untuk menilai respon sistem terhadap perlakuan variabel bebas, baik pada tahap karakterisasi *biochar* maupun pada tahap aplikasinya terhadap tanah tercemar. Variabel terikat dalam penelitian ini meliputi :

1. Karakteristik Material *Biochar* :
 - a) Fisik: Rendemen (*Yield*) produksi.
 - b) Kimia Dasar: Derajat keasaman (pH), *Electritrical conductivity* (EC), dan Analisis Proksimat (Kadar Air, Abu, Zat Terbang, Karbon Tetap).
2. Sifat Fisik Tanah (Pasca Inkubasi) :
 - a) Berat Isi Tanah (*Bulk density*) kering (g/cm³).
 - b) Berat Jenis Tanah (*Particle density*) (g/cm³).
 - c) Porositas Total Tanah (%)
3. Efektivitas Remediasi :
 - a) Konsentrasi Logam Berat Timbal (Pb) tersedia dalam tanah (mg/kg).
 - b) Efisiensi Stabilisasi Pb (%).
4. Analisis Karakterisasi Lanjut (Sampel Terpilih)
 - a) Morfologi permukaan dan struktur pori *biochar* dan tanah (Analisis SEM).
 - b) Sebaran unsur mineral utama (P, K, Ca, Mg) (Analisis EDX).
 - c) Identifikasi gugus fungsi permukaan *biochar* dan tanah (Analisis FTIR).
 - d) Estimasi luas permukaan spesifik (*specific surface area*, SSA) berbasis analisis citra.

3.7.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang dijaga tetap atau konstan selama penelitian berlangsung agar tidak mempengaruhi hasil eksperimen dan bias data. Variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi :

1. Proses *Pyrolysis* :
 - a) Waktu tinggal (*holding time*) pembakaran selama 1 jam.
 - b) Laju kenaikan suhu (*heating rate*) konstan sebesar (10°C/menit)
 - c) Kondisi atmosfer reaktor oksigen terbatas (*oxygen-limited*).
2. Aplikasi Tanah :
 - a) Jenis tanah media tanam (*top soil* homogen yang telah diayak lolos 2 mm).
 - b) Konsentrasi pencemar Timbal (Pb) pada tanah buatan (*spiking*) 100 mg/kg.
 - c) Dosis penambahan agen remediasi ke tanah (ditetapkan seragam 5% b/b).
 - d) Waktu inkubasi tanah selama 28 hari.
 - e) Kadar air tanah selama inkubasi dijaga pada kondisi kapasitas lapang (*field capacity*)

3.8 Objek Penelitian

Objek penelitian dalam studi ini meliputi *biochar* tunggal dan *biochar* komposit yang dihasilkan melalui proses *pyrolysis* dan *co-pyrolysis* menggunakan bahan baku lumpur limbah industri pengolahan pangan (*sludge*) dan *bagasse* (*bagasse*), serta tanah tercemar buatan logam berat Timbal (Pb) sebagai media uji aplikasi.

Biochar diproduksi dengan variasi komposisi bahan baku dan suhu *pyrolysis* (350 °C dan 500 °C) yang telah ditetapkan. Formulasi suhu *biochar* terpilih kemudian diaplikasikan ke dalam tanah tercemar buatan sebagai bahan remediasi untuk mengkaji pengaruhnya terhadap sifat fisik tanah, khususnya porositas serta efektivitasnya dalam menstabilkan logam berat Timbal (Pb). Analisis lanjutan terhadap sampel terpilih dilakukan untuk mendukung interpretasi mekanisme interaksi *biochar*, Tanah, dan logam berat.

Perlu digarisbawahi bahwa pengujian remediasi dalam penelitian ini menggunakan matriks tanah pertanian subur yang dikondisikan secara buatan (*artificially contaminated soil*) melalui metode *spiking* logam Pb. Karakteristik awal tanah dasar yang diambil dari lahan agrikultur ini secara alami masih memiliki retensi fisik yang baik dan status kimiawi yang stabil cenderung subur. Oleh karena itu, pengkondisian kontaminasi buatan di laboratorium ini belum mampu merepresentasikan kompleksitas degradasi tanah asli yang sudah lama terpapar oleh polusi multi logam pada kondisi riil lapangan, di mana struktur tanah biasanya sudah rusak dan kapasitas penyangga alaminya telah jauh menurun.

Sebagai langkah ekspansi dari batasan penelitian ini, studi selanjutnya sangat disarankan dan diharapkan untuk menggunakan tanah tercemar asli dari lokasi terdampak langsung, seperti lahan pertanian di kawasan industri atau area bekas penambangan. Penggunaan sampel tanah tercemar alami tersebut sangat penting guna menguji performa aktual *biochar* komposit ini dalam menghadapi kondisi tanah terdegradasi yang ekstrem, mengevaluasi persaingan penyerapan dengan ion logam pengganggu lainnya, serta mengukur efisiensi remediasi Pb di lingkungan lapangan yang sebenarnya.

3.9 Pelaksanaan Penelitian *Biochar*

Pelaksanaan penelitian dilakukan secara bertahap dan sistematis, dimulai dari persiapan alat dan bahan, proses konversi termal bahan baku menjadi *biochar*, karakterisasi *biochar* yang dihasilkan, hingga pengujian aplikasi *biochar* terhadap sifat fisik tanah dan efektivitas remediasi logam berat Timbal (Pb).

3.9.1 Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan dilakukan untuk memastikan seluruh tahapan penelitian dapat berjalan secara terkontrol dan menghasilkan data yang valid serta dapat direproduksi. Tahapan persiapan mencakup penyiapan bahan baku, peralatan konversi termal, serta instrumen pengujian *biochar* dan tanah.

1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

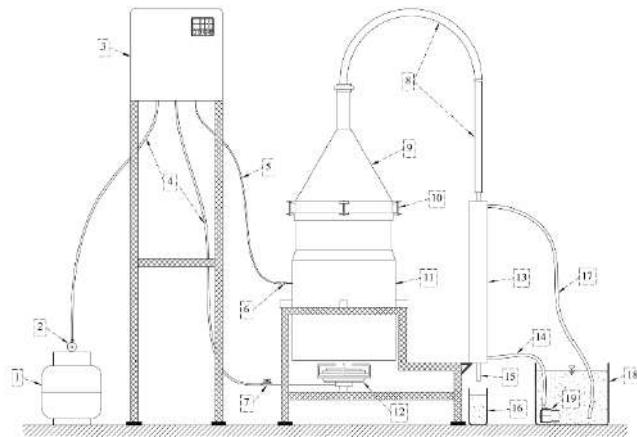
- a) Lumpur limbah (*sludge*).
- b) *Bagasse* (*bagasse*).

- c) Tanah.
- d) Garam Timbal ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$).
- e) Air suling (aquades).
- f) Larutan CaCl_2 0.01 M.
- g) Kertas saring.
- h) Wadah *inert*.

2. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

- a) Reaktor *pyrolysis*



Gambar 3. 1 Reaktor Pyrolysis

Sumber: Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Malang

Keterangan:

- 1. Tabung Gas
- 2. Regulator
- 3. Kontrol Panel
- 4. Selang Gas
- 5. Kabel Sensor
- 6. Sensor Suhu
- 7. Pengatur Tekanan Gas
- 8. Pipa Penghubung Reaktor->Kondensor
- 9. Penutup Tabung Reaktor

10. Baut Pengunci Reaktor
 11. Tabung Reaktor
 12. Pemanas
 13. Tabung Kondensor
 14. Selang Intlet Air Kondensor
 15. Pipa Output Yield Cair
 16. Wadah Penampung Yield Cair
 17. Selang Outlet Air Kondensor
 18. Wadah Penampung Air Kondensor
 19. Pompa Air Mini
- b) Oven pengering
 - c) Timbangan analitik
 - d) *Magnetic stirrer*
 - e) Piknometer
 - f) Gelas ukur
 - g) Erlenmeyer
 - h) Cawan petri
 - i) Cawan *crucible*
 - j) Labu ukur
 - k) Corong kaca
 - l) Alat pemotong dan penghalus (pisau/gunting, *grinder/blender*).
 - m) Ayakan (*sieve*) 80 mesh.
 - n) pH meter dan EC meter.
 - o) Furnace.
 - p) SEM-EDX.
 - q) FTIR.
 - r) AAS
 - s) Perangkat Lunak Image-J

3.9.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilaksanakan secara bertahap dan sistematis, dimulai dari persiapan bahan baku, sintesis *biochar*, karakterisasi awal,

aplikasi *biochar* pada tanah tercemar buatan, hingga analisis lanjutan terhadap sampel terpilih. Tahapan prosedur penelitian secara rinci dijelaskan sebagai berikut :

1. Persiapan dan Pengolahan Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas lumpur limbah industri pengolahan pangan (*sludge*) dan *bagasse* (*bagasse*). Penggunaan kedua material ini didasarkan pada potensinya sebagai agen remediasi dan perbaikan kualitas lahan (X. Chen dkk., 2022; Figueredo dkk., 2017).

- a) Lumpur limbah diperoleh dari unit *belt press* instalasi pengolahan air limbah industri pengolahan pangan. Sampel *sludge* dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama ± 1 jam guna menguapkan kadar air bebas secara optimal (X. Chen dkk., 2022; J. Zhang dkk., 2020). Sampel kemudian dihancurkan menggunakan *grinder* atau *chopper* dan diayak hingga lolos saringan ukuran 80 *mesh*. Reduksi ukuran dan pengayakan ini krusial untuk memastikan homogenitas partikel, yang akan memfasilitasi laju perpindahan panas (*heat transfer rate*) yang seragam ke seluruh bagian material selama proses *pyrolysis* berlangsung (Pellera dkk., 2021; J. Zhang dkk., 2020).

- b) *Bagasse* diperoleh dari limbah penjual es tebu. Sampel *bagasse* dicuci terlebih dahulu menggunakan air bersih untuk melarutkan sisa gula dan menghilangkan kotoran fisik (seperti tanah atau debu) yang dapat memicu anomali peningkatan kadar abu (*ash content*) pada produk akhir *biochar* (Chaudhary dkk., 2024; Duan dkk., 2020). Setelah pencucian, sampel dipotong menjadi ukuran ± 3 cm untuk memutus kepadatan makro jaringan serat lignoselulosa.

Selanjutnya, *bagasse* dikeringkan secara alami di bawah sinar matahari selama ± 2 hari. Metode penjemuran ini sangat efektif untuk menurunkan profil kelembaban awal biomassa secara masif dan hemat energi, sehingga meminimalkan hambatan termal saat *pyrolysis* (Kumar & Bhattacharya, 2021). Proses diakhiri dengan

pengeringan lanjutan di dalam oven pada suhu 105 °C selama ± 1 jam untuk memastikan biomassa mencapai massa kering yang stabil. Minimalisasi kadar air ini sangat esensial agar energi panas di dalam reaktor *pyrolysis* dapat terkonsentrasi untuk memecah struktur polimer kompleks (selulosa, hemiselulosa, dan lignin), bukan terbuang untuk fase penguapan air (Pinho dkk., 2019).

2. Formulasi Bahan Baku *Biochar*

Bahan baku yang telah dipersiapkan diformulasikan menjadi beberapa variasi, yaitu :

- a) *Biochar* tunggal berbasis sludge,
- b) *Biochar* tunggal berbasis bagasse tebu,
- c) *Biochar* komposit *sludge* + *bagasse* dengan perbandingan 50:50 (post-mixing)
- d) *Biochar* komposit *sludge* + *bagasse* dengan perbandingan 50:50 (pre-mixing)

Formulasi ini digunakan sebagai dasar variasi bahan baku dalam proses konversi termal untuk mengevaluasi dampak karakteristik matriks karbon tunggal versus hibrida komposit terhadap kapasitas immobilisasi logam berat. Perbedaan perlakuan antara metode pencampuran sebelum konversi termal (*pre-mixing*) dan pencampuran fisik arang pasca-konversi termal (*post-mixing*) sengaja dirancang untuk mendeteksi keberadaan efek sinergis termokimia pada level molekuler yang membedakan kualitas pori dan stabilitas produk akhir (Mohamed dkk., 2023; J. Zhang dkk., 2020).

4.4.1 Sintesis *Biochar* melalui Proses *Pyrolysis* dan *Co-pyrolysis*

Proses sintesis *biochar* dilakukan menggunakan reaktor *pyrolysis* dengan kondisi oksigen terbatas (*oxygen-limited condition*). Pembatasan suplai oksigen ini mutlak diterapkan dalam metode *pyrolysis* lambat (*slow pyrolysis*) untuk mencegah terjadinya pembakaran sempurna (*complete combustion*) biomassa menjadi abu mineral sepenuhnya, sehingga mengonsentrasikan reaksi termal fasa padat pada pembentukan kerangka karbon padat

yang kaya akan karbon mantap (Kumar & Bhattacharya, 2021; Mulyati dkk., 2025).

- a) *Biochar* tunggal diproduksi melalui proses *pyrolysis* konvensional, sedangkan *biochar* komposit diproduksi melalui proses *pyrolysis (post-mixing)* dan *co-pyrolysis (pre-mixing)*. Pendekatan *co-pyrolysis (pre-mixing)* memfasilitasi terjadinya transfer massa, transfer energi yang intensif, serta perengkahan bersama (*co-cracking*) fasa volatil antar bahan baku yang berbeda di dalam reaktor. Fenomena ini terbukti secara nyata mampu mengoptimalkan devolatilisasi jaringan organik sehingga menghasilkan nilai *volatile matter* yang lebih rendah dan struktur cincin aromatik yang jauh lebih stabil dibandingkan metode pembakaran terpisah pada skema *post-mixing* (Biney & Gusiati, 2024; Cao dkk., 2024; Ma dkk., 2022).
- b) Proses *pyrolysis* dilakukan pada suhu 350 °C dan 500 °C (laju pemanasan 10 °C/menit, waktu tinggal 1 jam). Suhu 350 °C mewakili fasa karbonisasi awal yang kaya gugus fungsi polar, sedangkan 500 °C menghasilkan *biochar* matang dengan mikropori luas dan efek pengapuran tinggi untuk imobilisasi kimiawi Pb (Hadey dkk., 2022; Hassan dkk., 2020; S. Wei dkk., 2019). Kondisi *slow pyrolysis* ini diterapkan untuk menjamin dekomposisi dan konversi bahan baku secara tuntas dan homogen (Moradi-choghamarani dkk., 2024; Pinho dkk., 2019).
- c) Produk *biochar* yang dihasilkan didinginkan hingga suhu ruang, kemudian disimpan dalam wadah kedap udara untuk mencegah kontaminasi dan perubahan sifat akibat kelembaban. Prosedur penyimpanan kedap udara ini sangat krusial mengingat fasa padatan matriks karbon *biochar* yang baru terbentuk memiliki aktivitas permukaan yang tinggi, bersifat sangat higroskopis, serta rentan menyerap

kelembaban atmosferik maupun gas sekitar yang dapat memicu degradasi fungsionalitas situs aktif permukaan atau bahkan memicu fasa swa-pemanasan (*self-heating*) material (Kumar & Bhattacharya, 2021).

4.4.2 Karakterisasi Fisiokimia Dasar *Biochar*

Seluruh sampel *biochar* hasil sintesis dikarakterisasi secara fisikokimia dasar yang meliputi :

- a) Rendemen (*yield*) produksi,
- b) Derajat keasaman (pH) dan *electrical conductivity* (EC),
- c) Uji proksimat (kadar air, kadar abu, zat terbang, dan karbon tetap).

Hasil karakterisasi ini digunakan sebagai dasar evaluasi awal kualitas *biochar* dan seleksi suhu *pyrolysis* terbaik untuk tahap penambahan pada tanah. Pemilihan kriteria seleksi berbasis parameter fisikokimia seperti kadar abu, *fixed carbon*, dan pH sangat krusial, mengingat sifat-sifat tersebut merupakan determinan utama dalam stabilitas material *biochar* di lingkungan tanah dan efektivitasnya dalam memitigasi mobilitas logam berat (Guo dkk., 2020; Hassan dkk., 2020; Pelleri dkk., 2021). Dengan menetapkan ambang batas kualitas yang terukur, penelitian ini memastikan bahwa material *biochar* yang ditambahkan memiliki kapasitas adsorpsi dan efek pengapuran (*liming effect*) yang memadai untuk mendukung keberhasilan proses imobilisasi Pb (Zafeer dkk., 2024; J. Zhang dkk., 2020).

3. Penentuan Suhu dan Formulasi *Biochar* Terpilih

Data hasil karakterisasi *biochar* pada suhu 350 °C dan 500 °C dianalisis secara komparatif untuk menentukan kondisi *pyrolysis* dan formulasi *biochar* yang paling optimal. Seleksi ini didasarkan pada kriteria kualitas material yang memenuhi standar remediasi tanah, terutama mempertimbangkan stabilitas karbon, tingkat alkalinitas (*liming effect*), dan pengembangan struktur pori yang krusial untuk imobilisasi Pb (Guo dkk., 2020; Hassan dkk., 2020; Pelleri dkk., 2021).

Proses penentuan ini melibatkan evaluasi multikriteria menggunakan metode *Weighted Multi-Criteria Biochar Scoring Method* terhadap parameter berikut:

- a. Stabilitas Karbon (*Fixed carbon*),
- b. Potensi Alkalinitas (pH dan EC),
- c. Pelepasan Zat Terbang (*Volatile Matter*),
- d. Kandungan Mineral (*Ash Content*),
- e. Kadar Air (*Moisture Content*).

Metode skoring digunakan untuk mengevaluasi kualitas *biochar* secara kuantitatif berdasarkan kombinasi parameter proksimat dan sifat kimia yang berpengaruh terhadap kestabilan karbon, tingkat karbonisasi, serta potensi remediasi logam berat Pb (Mohamed dkk., 2023). Setiap parameter diklasifikasikan ke dalam kategori *benefit criteria* dan *cost criteria*. Parameter bertipe *benefit* merupakan parameter yang nilainya semakin tinggi dianggap semakin baik, sedangkan parameter bertipe *cost* merupakan parameter yang nilainya semakin rendah dianggap semakin baik.

Klasifikasi parameter yang digunakan dalam proses skoring ditunjukkan pada Tabel 3. 3 berikut.

Tabel 3. 3 Klasifikasi Parameter Skoring *Biochar*

Parameter	Jenis Kriteria
Kadar Air	<i>Cost</i>
Kadar Abu	<i>Benefit</i>
<i>Volatile matter</i> (VM)	<i>Cost</i>
<i>Fixed carbon</i> (FC)	<i>Benefit</i>
pH	<i>Bemefit</i>
<i>Electrical Conductivity</i> (EC)	<i>Benefit</i>

Parameter *fixed carbon* dan pH diberikan bobot terbesar karena memiliki pengaruh dominan terhadap kestabilan karbon *biochar* dan mekanisme imobilisasi logam Pb (Guo dkk., 2020). Nilai FC yang tinggi menunjukkan terbentuknya struktur karbon aromatik yang lebih stabil dan resisten terhadap degradasi mikroba tanah (S. Wei dkk., 2019).

Sementara itu, pH alkalis berperan penting dalam memicu proses presipitasi kimiawi kation logam berat bebas (Pb^{2+}) menjadi bentuk hidroksida, karbonat, atau fosfat yang kurang larut, sehingga menurunkan mobilitas logam berat di dalam tanah secara signifikan (Cao dkk., 2024; Vannini dkk., 2021).

Bobot parameter yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3. 4 berikut.

Tabel 3. 4 Bobot Parameter dalam Metode Skoring *Biochar*

Parameter	Bobot (%)
Kadar Air	30
Kadar Abu	25
<i>Volatile matter</i> (VM)	15
<i>Fixed carbon</i> (FC)	10
pH	10
<i>Electrical Conductivity</i> (EC)	10

Seluruh parameter kemudian dinormalisasi menggunakan metode *min-max normalization* ke dalam skala 1–5 untuk menghilangkan perbedaan satuan antar parameter. Perhitungan skor normalisasi untuk parameter bertipe *benefit* menggunakan Persamaan (3.1);

$$\text{Skor}_{ij} = 1 + 4 \times \left(\frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right) \quad (3.1)$$

Keterangan

X_{ij} = nilai data parameter ke- i pada sampel *biochar* ke- j

$X_{\min}$ = nilai minimum parameter i dari seluruh variasi sampel

$X_{\max}$ = nilai maksimum parameter i dari seluruh variasi sampel

Sedangkan normalisasi parameter bertipe *cost* dihitung menggunakan Persamaan (3.2);

$$\text{Skor}_{ij} = 1 + 4 \times \left(\frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \right) \quad (3.2)$$

Nilai hasil normalisasi kemudian dikalikan dengan bobot masing-masing parameter menggunakan metode *weighted scoring* untuk

memperoleh nilai total evaluasi setiap *biochar*. Perhitungan skor total dilakukan menggunakan Persamaan (3.3);

$$\text{Nilai Total} = \sum (\text{Skor}_i \times \text{Bobot}_i) \quad (3.3)$$

Biochar dengan nilai total tertinggi ditetapkan sebagai kandidat terbaik untuk aplikasi remediasi dan remediasi tanah tercemar Pb.

Proses skoring dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama dilakukan terhadap seluruh variasi produk *biochar* pada suhu 350 °C dan 500 °C untuk mengevaluasi pengaruh suhu *pyrolysis* secara luas terhadap evolusi karakteristik proksimat *biochar* (Tomczyk dkk., 2020). Tahap kedua dilakukan khusus pada kelompok *biochar* suhu tinggi (500 °C) untuk menyeleksi kandidat *biochar* terbaik yang paling potensial berdasarkan pengaruh bahan baku tunggal maupun metode pencampuran (*pre-mix* dan *post-mix*), yang selanjutnya akan diaplikasikan pada tahap inkubasi tanah dan pengujian efisiensi remediasi Pb (Chaudhary dkk., 2024; J. Zhang dkk., 2020).

4. Fisik dan Kimia Tanah Awal

Pengujian sifat fisik dan kimia tanah dilakukan sebelum masa penambahan larutan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Sampel tanah terlebih dahulu melalui tahap persiapan awal untuk memastikan kondisi yang seragam sebelum *spiking* dan inkubasi.

a) Persiapan Sampel Tanah (*Pre-Treatment*)

Sampel tanah hasil inkubasi dipersiapkan sebelum dilakukan pengujian fisik dan kimia dengan tahapan sebagai berikut:

- Sampel tanah dikeringkan pada suhu kamar (*air-dry*) hingga mencapai kadar air yang stabil. Metode pengeringan udara atau pada suhu rendah umum digunakan untuk menjaga karakteristik kimia tanah tetap terjaga sebelum ekstraksi atau analisis lebih lanjut (Szostek dkk., 2024; Vannini dkk., 2021).
- Gumpalan tanah dihancurkan secara perlahan menggunakan mortar dan alu untuk menghindari kerusakan mekanis pada struktur partikel primer. Tahap ini sangat krusial karena

ukuran partikel memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas pengukuran dan homogenitas sampel dalam analisis laboratorium (S. Chen dkk., 2024; Vannini dkk., 2021).

- Dari setiap sampel tanah seberat ± 100 g, sebanyak ± 90 g dialokasikan untuk pengujian sifat fisik tanah dan ± 10 g digunakan untuk pengujian sifat kimia tanah.

Tahap persiapan ini bertujuan untuk menyeragamkan ukuran partikel tanah sehingga hasil pengujian antar perlakuan dapat dibandingkan secara konsisten dan ilmiah (Houba dkk., 2000). Sesuai dengan prosedur standar, homogenitas sampel yang diperoleh melalui pengayakan dan pencampuran yang tepat sangat penting untuk menjamin validitas hasil analisis (Vannini dkk., 2021).

b) Pengukuran Berat Jenis Partikel Tanah (*Particle Density*)

Pengukuran berat jenis partikel tanah dilakukan sebagai data dasar dalam perhitungan porositas tanah, mengacu pada ASTM D854-14 dengan metode piknometer air.

Langkah-langkah pengujian adalah sebagai berikut:

- Sampel tanah hasil ayakan 2 mm dikeringkan dalam oven hingga berat konstan.
- Sebanyak 10–20 g tanah kering oven ditimbang dengan neraca analitik dan dicatat sebagai massa tanah kering.
- Sampel tanah dimasukkan ke dalam piknometer yang telah dikalibrasi dan diketahui volumenya.
- Air suling ditambahkan ke dalam piknometer hingga tanah terendam seluruhnya.
- Udara yang terjebak di dalam pori tanah dihilangkan dengan pemanasan ringan atau menggunakan pompa vakum sesuai prosedur ASTM D854-14.
- Setelah udara terlepas, piknometer diisi penuh dengan air suling hingga tanda kalibrasi, kemudian bagian luar piknometer dikeringkan.

- Piknometer yang berisi tanah dan air ditimbang untuk memperoleh massa total.
- Berat jenis partikel tanah dihitung berdasarkan perbandingan massa tanah terhadap volume partikel padat yang diperoleh dari selisih volume air.
Nilai berat jenis partikel tanah mineral umumnya berada pada kisaran 2,60–2,75 g/cm³.

c) Pengukuran Bobot Isi Tanah (*Bulk Density*)

Pengukuran bobot isi tanah dilakukan menggunakan metode curah bebas untuk tanah terganggu, mengacu pada ISO 7837:1992.

Tahapan pengujian meliputi:

- Gelas ukur berkapasitas 100 mL digunakan sebagai pengganti silinder standar.
- Sampel tanah hasil ayakan 2 mm dimasukkan ke dalam gelas ukur melalui corong dari ketinggian tertentu agar tanah jatuh secara alami tanpa pemadatan tambahan.
- Tanah dibiarkan mengendap selama ± 2 menit untuk mencapai kondisi curah stabil.
- Permukaan tanah diratakan tepat pada batas skala volume tanpa menekan tanah.
- Massa tanah di dalam gelas ukur ditimbang menggunakan neraca analitik.
- Bobot isi tanah dihitung sebagai perbandingan antara massa tanah terhadap volume tanah di dalam gelas ukur.
Nilai bobot isi digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemadatan tanah.

d) Perhitungan Porositas Tanah

Porositas tanah tidak diukur secara langsung, melainkan dihitung berdasarkan nilai bobot isi dan berat jenis partikel tanah, mengacu pada (SNI 06-6989.54-2005).

Langkah perhitungan dilakukan sebagai berikut:

- Nilai bobot isi tanah (BD) diperoleh dari hasil pengujian ISO 7837.
- Nilai berat jenis partikel tanah (PD) diperoleh dari hasil pengujian ASTM D854.
- Porositas tanah dihitung menggunakan persamaan:

$$n = 1 - \frac{BD}{PD} \times 100 \quad (3.4)$$

Nilai porositas digunakan sebagai acuan awal tanah sebelum perlakuan.

5. Preparasi Tanah Tercemar Buatan

Tanah yang digunakan sebagai media uji merupakan *top soil* homogen yang telah diayak lolos saringan 2 mm.

a) Perhitungan Kebutuhan Pb

Konsentrasi target Pb dalam tanah ditetapkan sebesar 100 ppm. Konsentrasi ini dipilih untuk menyimulasikan tingkat pencemaran antropogenik sedang (*moderate contamination*) yang umum dijumpai di lahan pertanian sekitar kawasan industri, di mana kadar tersebut cukup signifikan untuk diamati efek remediasinya tanpa bersifat letal bagi seluruh aktivitas biologis tanah (Fika dkk., 2021; Liu dkk., 2020). 100 ppm setara dengan:

- Konsentrasi target Pb dalam tanah ditetapkan sebesar 100 ppm, yang setara dengan:

$$100 \text{ ppm} = \frac{100 \text{ mg Pb}}{1 \text{ kg Tanah}} \quad (3.5)$$

- Dengan massa tanah sebesar 2 kg, maka total Pb yang dibutuhkan adalah:

$$100 \text{ mg Pb} \times 2 \text{ kg Tanah} = 200 \text{ mg Pb} \quad (3.6)$$

- Sumber Pb yang digunakan adalah $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ dengan massa molekul sebesar 331,2 g/mol, sedangkan massa atom Pb adalah 207,2 g/mol.
- Faktor konversi $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ terhadap Pb adalah:

$$\frac{331.2}{207.2} = 1.598 \quad (3.7)$$

- Dengan demikian, massa $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ yang diperlukan untuk menyediakan 200 mg Pb adalah:

$$200 \text{ mg} \times 1.598 = 319,6 \text{ mg } \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 \quad (3.8)$$

Sehingga, massa $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ yang ditambahkan ke dalam 2 kg tanah adalah $\pm 0,320$ gram.

b) Prosedur Spiking Tanah

Proses pencemaran buatan (*spiking*) dilakukan untuk mensimulasikan kondisi tanah tercemar logam berat timbal (Pb) secara terkontrol di laboratorium. Metode ini bertujuan menghasilkan distribusi kontaminan yang homogen sehingga pengaruh aplikasi *biochar* terhadap proses remediasi dapat diamati secara lebih representatif (Fika dkk., 2021; Zheng dkk., 2017).

- Sampel tanah lapisan atas (*topsoil*) dikeringanginkan, dihancurkan secara manual, kemudian diayak menggunakan saringan berukuran 2 mm. Tanah yang telah homogen ditimbang sebanyak 2.000 gram berat kering dan dimasukkan ke dalam wadah pencampur inert. Tahap preparasi ini dilakukan untuk menyeragamkan ukuran partikel dan kondisi awal sampel sehingga distribusi kontaminan selama proses pencampuran dapat berlangsung lebih merata (Fika dkk., 2021). Pengeringan dan pengayakan juga bertujuan untuk mempermudah proses penyeragaman sampel serta menjaga konsistensi kondisi sampel sebelum tahapan pengujian selanjutnya (S. Chen dkk., 2024; Vannini dkk., 2021).
- Larutan kontaminan dipreparasi dengan melarutkan 0,320 gram $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ke dalam 200 mL air suling hingga homogen. Senyawa ini dipilih karena kelarutannya yang tinggi memungkinkan kation Pb^{2+} terdispersi merata ke seluruh matriks tanah. Larutan tersebut diinjeksikan ke

dalam sampel dengan proporsi volume setara 10% dari berat kering tanah. Pendekatan ini bertujuan untuk mempertahankan kelembapan yang terkendali selama proses *spiking* dan inkubasi (Mulyati dkk., 2025). Pengendalian kadar air secara presisi ini esensial untuk memastikan distribusi kontaminan berlangsung seragam sebelum memasuki tahapan aplikasi *biochar* (Fika dkk., 2021).

- Larutan $Pb(NO_3)$ ditambahkan ke dalam tanah secara bertahap sambil dilakukan pengadukan menggunakan spatula *stainless steel* atau pengaduk mekanis berkecepatan rendah hingga tercampur merata. Penambahan secara bertahap (*gradual addition*) dilakukan untuk mencegah terbentuknya zona konsentrasi lokal (*hotspots*) yang dapat menyebabkan distribusi logam berat tidak homogen. Teknik ini memungkinkan ion Pb tersebar lebih merata sehingga kondisi pencemaran buatan menjadi lebih representatif. Homogenisasi bertahap diketahui penting untuk mengurangi variasi konsentrasi logam antar bagian sampel tanah (Fika dkk., 2021), serta menghindari data *error* akibat pencampuran kontaminan cair yang tidak merata (Zheng dkk., 2017).
- Setelah seluruh larutan kontaminan ditambahkan, campuran tanah diaduk kembali selama ± 10 menit hingga diperoleh kondisi homogen tanpa adanya genangan air bebas pada permukaan tanah. Tahap homogenisasi bertujuan memastikan seluruh partikel tanah memiliki peluang kontak yang sama dengan ion Pb^{2+} sehingga distribusi kontaminan lebih seragam dan hasil pengujian remediasi menjadi lebih valid serta reproduktif (Fika dkk., 2021).

- Tanah tercemar yang telah homogen dimasukkan ke dalam wadah tertutup, kemudian diinkubasi selama 14 hari pada suhu ruang ($\pm 30^{\circ}\text{C}$) (Mulyati dkk., 2025). Masa inkubasi (*aging process*) dilakukan agar ion Pb^{2+} memiliki waktu yang cukup untuk berinteraksi dengan fraksi mineral dan koloid tanah melalui mekanisme adsorpsi, pertukaran ion, dan kompleksasi hingga tercapai kondisi kesetimbangan kimia (Zheng dkk., 2017). Proses *aging* penting karena logam berat yang baru ditambahkan umumnya masih berada dalam bentuk mudah larut dan belum stabil pada matriks tanah. Selain itu, masa inkubasi diperlukan untuk menghasilkan karakteristik pencemaran buatan yang lebih mendekati kondisi kontaminasi aktual di lingkungan dan mendukung stabilitas imobilisasi Pb dalam jangka panjang (Fika dkk., 2021).

6. Aplikasi *Biochar* pada Tanah dan Inkubasi

Biochar terpilih hasil tahap karakterisasi diaplikasikan ke dalam tanah tercemar buatan dengan dosis 5% (b/b) berdasarkan berat kering tanah. Pemilihan dosis ini didasarkan pada keunggulan *biochar* yang memiliki porositas tinggi, luas permukaan besar, serta gugus fungsi permukaan yang melimpah, menjadikannya substrat yang luar biasa untuk menyisihkan logam berat dari tanah dan air yang terkontaminasi (Kumar & Bhattacharya, 2021; Zafeer dkk., 2024). Dosis ini memastikan interaksi yang efektif antara *biochar* dan matriks tanah tanpa menyebabkan perubahan struktur tanah yang ekstrem.

Langkah-langkah aplikasi *biochar* pada tanah dilakukan sebagai berikut:

- a) Penimbangan Tanah
 - Tanah tercemar buatan hasil proses *spiking* dan inkubasi ditimbang 100 gram untuk setiap unit percobaan.
- b) Penambahan *Biochar*

- *Biochar* ditimbang sesuai dosis 5% (b/b) dari berat tanah kering, kemudian ditambahkan ke dalam tanah secara bertahap.

c) Homogenisasi

- Pencampuran tanah dan *biochar* dilakukan secara manual menggunakan spatula atau secara mekanis dengan kecepatan rendah hingga diperoleh campuran yang homogen dan tidak terlihat aglomerasi *biochar*.

d) Inkubasi dalam Wadah

- Campuran tanah *biochar* dimasukkan ke dalam wadah inkubasi berbahan *inert*, kemudian diratakan tanpa pemadatan berlebih untuk mempertahankan struktur tanah yang mendekati kondisi alami.

e) Penyusunan Perlakuan

- K0: Tanah tercemar tanpa penambahan *biochar* (kontrol).
- P1: Tanah tercemar dengan penambahan *biochar* berbasis *sludge*.
- P2: Tanah tercemar dengan penambahan *biochar* berbasis *bagasse* tebu.
- P3: Tanah tercemar dengan penambahan *biochar* komposit *sludge–bagasse* (50:50) hasil *post-mixing*.
- P4: Tanah tercemar dengan penambahan *biochar* komposit *sludge–bagasse* (50:50) hasil *pre-mixing*.

Durasi inkubasi 28 hari ditetapkan untuk memastikan interaksi antara *biochar* dan tanah mencapai kesetimbangan kimia, serta memungkinkan terjadinya imobilisasi logam berat dan stabilisasi karbon organik dalam agregat tanah secara optimal (S. Chen dkk., 2024; Mohamed dkk., 2023).

7. Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Tanah Setelah Perlakuan

Setelah masa inkubasi, dilakukan pengujian terhadap sifat tanah yang meliputi :

- a) Pengujian sifat fisik tanah mencakup parameter berat isi (*bulk density*), kerapatan partikel (*particle density*), dan porositas total. Seluruh metode pengukuran diselaraskan dengan prosedur uji tanah awal sebelum proses *spiking* kontaminan dan aplikasi remediasi guna menjaga konsistensi komparasi data. Pendekatan ini diterapkan untuk mengevaluasi kapasitas *biochar* dalam mereduksi kepadatan matriks tanah secara presisi. Penurunan kepadatan struktural tersebut berperan langsung dalam memperbaiki distribusi jaringan pori dan memulihkan tingkat aerasi di dalam tanah (Moradi-choghamarani dkk., 2024; B. Wei dkk., 2023).
- b) Pengujian sifat kimia tanah meliputi derajat keasaman (pH), *electrical conductivity* (*electrical conductivity*/EC), dan konsentrasi logam berat Timbal (Pb) tersedia (*bioavailable/soluble Pb*). Pengukuran konsentrasi Pb dilakukan menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk menentukan fraksi Pb yang masih tersedia di dalam tanah setelah aplikasi *biochar* (Mulyati dkk., 2025; Vannini dkk., 2021).

1. Ekstraksi pH dan EC

- Timbang 10 gram tanah kering udara hasil inkubasi ke dalam erlenmeyer.
- Ditambahkan *aquades* sebesar 100 ml ke dalam erlenmeyer.
- Larutan kemudian diagitasi selama 1 menit menggunakan *magnetic stirrer*.
- Diamkan larutan hingga tersuspensi kemudian diukur menggunakan pH meter dan EC meter

2. Pembuatan larutan CaCl_2 0.01M

Larutan kalsium klorida CaCl_2 0,01 M digunakan sebagai larutan ekstraktan dalam analisis ketersediaan logam berat. Metode ekstraksi menggunakan CaCl_2 0,01 M dipilih

karena mampu mensimulasikan kekuatan ionik alami larutan pori tanah tanpa mengubah kondisi pH asli tanah, sehingga sesuai digunakan untuk analisis Pb *soluble* pada tanah yang telah diberi remediasi *biochar* (Houba dkk., 2000). Pembuatan larutan dilakukan secara teliti dan sistematis dengan tahapan sebagai berikut.

- Data perhitungan:
 - Molaritas (M) = 0,01 mol/L
 - Volume larutan (V) = 1 L
 - Berat molekul (BM) CaCl_2 = 110,98 g/mol
- Hasil perhitungan:
$$0,01 \times 1 \times 110,98 = 1,1098 \text{ gram} \quad (3.9)$$
- Massa CaCl_2 yang ditimbang untuk pembuatan larutan CaCl_2 0,01 M sebanyak 1 liter adalah $\pm 1,11$ gram.
- Kristal CaCl_2 ditimbang secara teliti sebanyak $\pm 1,1$ gram menggunakan timbangan analitik.
- Kristal yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam labu erlenmeyer, kemudian ditambahkan sekitar 200 mL air destilasi dan diaduk hingga kristal larut sempurna.
- Larutan dipindahkan secara kuantitatif ke dalam labu ukur 1000 mL.
- Air bebas ion ditambahkan ke dalam labu ukur hingga mendekati tanda batas, kemudian penambahan dilakukan secara perlahan menggunakan pipet tetes hingga meniskus bawah larutan tepat sejajar dengan garis batas volume 1000 mL.
- Labu ukur ditutup dan dibolak-balikkan minimal 10 kali untuk memastikan larutan tercampur secara homogen.

- Larutan CaCl_2 0,01 M yang telah homogen diberi label.

4.4.3 Ekstraksi Pb *soluble*

- Sebanyak 10 gram sampel tanah kering udara ditimbang dan dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer.
- Tambahkan 100 ml larutan CaCl_2 (rasio 1:10 w/v) sesuai dengan protokol (Houba dkk., 2000).
- Larutan kemudian diagitasi selama 2 jam menggunakan *magnetic stirrer*.
- Larutan kemudian disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan padatan.
- Filtrat hasil penyaringan ditampung dan disimpan dalam botol inert gelap untuk mencegah perubahan kimia akibat cahaya.
- Konsentrasi Pb dalam filtrat dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS).

8. Analisis Pengaruh Karakteristik *Biochar* terhadap Kinerja Penurunan Logam

Analisis lanjutan difokuskan pada dua varian sampel *biochar* yang menunjukkan perbedaan kinerja paling signifikan, yaitu sampel dengan efisiensi penurunan Pb terendah dan tertinggi. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik fisikokimia spesifik yang menjadi faktor penentu utama keberhasilan remediasi. Instrumen yang digunakan meliputi:

- a) *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray* (SEM–EDX)

Analisis morfologi dilakukan secara komparatif antara sampel terburuk dan terbaik untuk melihat perbedaan struktur permukaan dan porositas. Fitur EDX digunakan untuk

membandingkan intensitas sinyal unsur Pb yang teradsorpsi pada permukaan kedua sampel, memvalidasi korelasi antara kerapatan presipitat logam dengan data efisiensi penurunan yang diperoleh (Guo dkk., 2020).

b) *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Spektrum FTIR dari kedua sampel dibandingkan untuk menelusuri perbedaan kelimpahan gugus fungsi aktif. Jika sampel terbaik menunjukkan intensitas pita serapan (seperti -OH atau -COOH) yang jauh lebih kuat atau mengalami pergeseran *wavenumber* yang lebih signifikan dibanding sampel terburuk, hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme kemisorpsi memegang peranan vital dalam proses remediasi (Hassan dkk., 2020).

c) Estimasi Porositas Area dan Karakterisasi Morfologi Pori Berbasis Citra SEM Menggunakan ImageJ

Analisis citra dua dimensi (2D) berbasis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengestimasi porositas area serta mengkarakterisasi morfologi pori *biochar*. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi perkembangan struktur pori yang meliputi jumlah pori, luas pori, ukuran pori, bentuk pori, dan persentase area pori sebagai parameter yang berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi dan imobilisasi logam berat. Analisis citra digital pada mikrograf SEM telah banyak digunakan untuk menghubungkan karakteristik struktur pori dengan performa remediasi material karbon berpori (Leng dkk., 2021; Srocke dkk., 2021).

1. Akuisisi Citra (*Image Acquisition*):

- Mikrograf *biochar* diperoleh menggunakan instrumen SEM pada perbesaran 2.000×. Perbesaran tersebut dipilih karena mampu menampilkan distribusi dan geometri pori secara representatif pada permukaan *biochar*. Citra disimpan dalam format TIFF beresolusi tinggi untuk mempertahankan kualitas visual selama

proses pengolahan dan analisis data (Turunen dkk., 2023).

2. Pra-pemrosesan Citra (*Pre-processing*):

- Citra SEM diimpor ke dalam perangkat lunak ImageJ dan dikonversi ke format *grayscale* 8-bit. Kalibrasi skala dilakukan menggunakan *scale bar* pada citra SEM sehingga ukuran piksel dapat dikonversi ke satuan mikrometer (μm). Penyesuaian kontras dan kecerahan dilakukan untuk meningkatkan pemisahan antara area pori dan matriks padatan sehingga akurasi segmentasi dapat ditingkatkan (Abdo dkk., 2023).

3. Segmentasi dan *Thresholding*:

- Identifikasi pori dilakukan melalui proses *thresholding* untuk memisahkan area pori dari matriks padatan *biochar*. Metode *automatic thresholding* digunakan untuk mengurangi subjektivitas dalam penentuan batas objek dan latar belakang.
- Hasil segmentasi kemudian dikonversi menjadi citra biner sehingga area pori dapat diidentifikasi sebagai objek yang akan dianalisis lebih lanjut. Validasi visual dilakukan dengan membandingkan hasil segmentasi terhadap citra SEM asli untuk memastikan kesesuaian objek yang terdeteksi (Abdo dkk., 2023).

4. Analisis Morfologi Pori:

- Karakteristik morfologi pori dianalisis menggunakan fitur *Analyze Particles* pada perangkat lunak ImageJ. Parameter yang diukur meliputi jumlah pori (*count*), luas pori total (*total area*), luas pori rata-rata (*average size*), persentase area pori (*%Area*), *circularity*, *solidity*, dan diameter Feret (*Feret diameter*) (Sui dkk., 2023).

- Persentase area pori (*%Area*) digunakan sebagai estimasi porositas area permukaan *biochar* dan dihitung menggunakan Persamaan (3.11).

$$\text{Porositas Area (\%)} = \frac{\text{Luas Total Bidang Pengamatan}}{\text{Luas Area Pori}} \times 100 \quad (3.11)$$

Keterangan:

Porositas Area (%): persentase area pori terhadap total bidang pengamatan SEM (%)

Luas Area Pori: total luas pori yang terdeteksi pada citra (μm^2)

Luas Total Bidang Pengamatan: luas keseluruhan area citra SEM yang dianalisis (μm^2)

9. Analisis Data dan Pembahasan

Analisis data dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu analisis statistik inferensial untuk data kuantitatif dan analisis deskriptif untuk data kualitatif/mikroskopis. Uji parametrik ini diterapkan untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu *pyrolysis* dan komposisi bahan baku terhadap beberapa variabel terikat secara simultan.

a) Analisis Statistik Data Kuantitatif

Data hasil pengukuran sifat fisik dan kimia *biochar* dianalisis menggunakan uji *Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA) satu arah (*one-way*). Uji ini dipilih untuk menentukan pengaruh suhu dan komposisi bahan *biochar* (tunggal dan komposit) terhadap sekumpulan variabel dependen secara simultan guna menghindari kesalahan Tipe I (*family-wise error rate*) multivariabel (Adebayo & Loko, 2024; Ergin & Koşkan, 2024).

b) Analisis Deskriptif-Kualitatif

- Morfologi permukaan dan distribusi unsur (SEM-EDX),
- Gugus fungsi permukaan (FTIR), dan
- Estimasi luas permukaan spesifik berbasis citra (ImageJ).

3.10 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi bahan baku, metode konversi termal, dan aplikasi *biochar* terhadap karakteristik material serta perbaikan sifat tanah tercemar timbal (Pb). Data yang dianalisis meliputi karakteristik fisikokimia *biochar*, sifat fisik tanah, dan efektivitas imobilisasi logam berat Pb setelah perlakuan.

3.10.1 Analisis Data Karakteristik *Biochar*

Analisis data *biochar* dilakukan untuk menentukan kualitas material dan memilih *biochar* terbaik sebelum tahap aplikasi tanah. Parameter yang dianalisis meliputi :

1. Rendemen (*yield*) *biochar*, yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi konversi termal pada berbagai variasi suhu *pyrolysis* dan komposisi bahan baku.
2. Derajat keasaman (pH) dan *Electrical conductivity* (EC), sebagai indikator reaktivitas kimia dan potensi pengaruh *biochar* terhadap kondisi kimia tanah (Cheng dkk., 2020).
3. Analisis proksimat yang meliputi kadar air (*moisture content*), kadar abu (*ash content*), zat terbang (*volatile matter*), dan karbon tetap (*fixed carbon*), untuk mengevaluasi tingkat karbonisasi, kestabilan termal, serta kualitas fraksi karbon *biochar* (Tomczyk dkk., 2020).

Data kuantitatif karakteristik *biochar* yang meliputi kadar air, kadar abu, *volatile matter* (VM), *fixed carbon* (FC), pH, dan *electrical conductivity* (EC) dianalisis menggunakan *Two-Way Multivariate Analysis of Variance* (*Two-Way MANOVA*) pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ untuk mengevaluasi pengaruh bahan baku, suhu *pyrolysis*, dan interaksinya. Sebelum analisis, data diuji normalitas dan homogenitas varians menggunakan *Levene's Test* (Adebayo & Loko, 2024; He dkk., 2024). Jika asumsi homogenitas tidak terpenuhi, interpretasi hasil diprioritaskan menggunakan statistik *Pillai's Trace* karena lebih robust terhadap pelanggaran homogenitas pada rancangan seimbang (*balanced design*) (Ergin & Koşkan, 2024).

Penentuan *biochar* terbaik dilakukan menggunakan analisis multikriteria berbobot (*weighted multi-criteria assessment*) berdasarkan enam parameter karakterisasi, yaitu kadar air, kadar abu, VM, FC, pH, dan EC (Cheng dkk., 2020; Tomczyk dkk., 2020). Setiap parameter diklasifikasikan sebagai *benefit criteria* atau *cost criteria*, kemudian dinormalisasi dengan metode *min-max normalization* ke dalam skor 1–5. Skor yang diperoleh dikalikan dengan bobot masing-masing parameter dan dijumlahkan untuk menghasilkan nilai total sebagai dasar pemeringkatan perlakuan (Farkas dkk., 2021).

Bobot terbesar diberikan pada FC dan pH karena keduanya berperan penting dalam stabilitas karbon jangka panjang dan imobilisasi Pb di dalam tanah ((Tomczyk dkk., 2020). Skor akhir digunakan untuk menentukan kombinasi bahan baku dan suhu *pyrolysis* terbaik yang dipilih untuk tahap inkubasi tanah dan pengujian remediasi Pb.

Data morfologi permukaan dari *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan profil gugus fungsi dari *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dianalisis secara deskriptif-komparatif sebagai data kualitatif pendukung. Kedua analisis ini digunakan untuk mengonfirmasi mekanisme adsorpsi fisik, kompleksasi permukaan, dan presipitasi mineral pada *biochar* dengan kemampuan penurunan mobilitas Pb tertinggi dan terendah (Matin & Aydin, 2022).

3.10.2 Analisis Data Sifat Fisik Tanah

Analisis sifat fisik tanah dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas *biochar* sebagai bahan remediasi tanah. Parameter yang dianalisis meliputi:

1. Derajat keasaman (pH) tanah, sebagai indikator perubahan reaksi tanah dan pengaruhnya terhadap mobilitas logam berat.
2. Berat isi tanah (*Bulk density*), untuk menilai tingkat pemadatan tanah setelah aplikasi *biochar*.
3. Porositas total tanah, sebagai indikator perbaikan struktur tanah dan sirkulasi udara-air.

Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, kemudian dianalisis secara deskriptif melalui perbandingan nilai antar perlakuan

dan kontrol tanpa perlakuan. Interpretasi dilakukan berdasarkan kecenderungan perubahan setiap parameter untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi *biochar* terhadap sifat fisik tanah selama masa inkubasi.

3.10.3 Analisis Data Efektivitas Remediasi Logam Timbal (Pb)

Analisis efektivitas remediasi difokuskan pada kemampuan *biochar* dalam menurunkan konsentrasi dan bioavailabilitas Timbal (Pb) di dalam tanah.

Parameter yang dianalisis meliputi :

1. Konsentrasi Pb total dalam tanah setelah perlakuan, dibandingkan dengan kontrol dan baku mutu lingkungan.
2. Efisiensi penurunan Pb, dihitung berdasarkan selisih konsentrasi sebelum dan sesudah aplikasi *biochar*.

Hasil analisis tersebut digunakan untuk mengidentifikasi perlakuan *biochar* dengan kinerja remediasi tertinggi dan terendah. Selanjutnya, kedua sampel terpilih dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX), dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) guna mengkaji karakteristik morfologi permukaan, komposisi unsur, serta gugus fungsi yang berpotensi berperan dalam proses imobilisasi logam berat (Zafeer dkk., 2024).

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan *biochar* tunggal dan *biochar* komposit dari sludge IPAL dan bagasse tebu melalui proses *pyrolysis* dan *co-pyrolysis* pada suhu 350°C dan 500°C. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi bahan baku dan suhu proses terhadap karakteristik *biochar* yang dihasilkan, meliputi rendemen (*yield*), kadar abu, *volatile matter*, *fixed carbon*, pH, dan *electrical conductivity* (EC). Selanjutnya, *biochar* diaplikasikan pada tanah tercemar buatan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap sifat fisik tanah dan penurunan konsentrasi timbal (Pb). Sampel *biochar* terpilih kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan SEM, EDX, dan FTIR untuk mengkaji karakteristik yang berperan dalam mekanisme remediasi logam berat.

4.1 Karakteristik Awal Material

4.1.1 Karakteristik Awal Tanah

Karakterisasi awal tanah dilakukan untuk mengetahui kondisi dasar tanah sebelum diberikan perlakuan *biochar*. Parameter yang dianalisis meliputi kadar air, *bulk density*, *particle density*, porositas, pH, dan *electrical conductivity* (EC). Parameter-parameter ini berperan penting dalam menentukan sifat fisik dan kimia tanah sebelum dipengaruhi interaksi antara tanah, *biochar*, dan kontaminan logam berat.

Tabel 4. 1 Karakterisasi Awal Tanah *topsoil*

Parameter	Nilai	Satuan
Kadar Air	4.45	%
<i>Bulk density</i> (pb)	1,0394	g/cm ³
<i>Particle density</i> (pp)	1,769	g/cm ³
Porositas	41,2	%
pH	7,45	-
EC	196	μS/cm

Nilai *bulk density* tanah awal 1,0394 g/cm³ berada pada rentang ideal *topsoil* gembur (1,0–1,3 g/cm³), mengindikasikan struktur antar-agregat yang terbuka (Rusdi dkk., 2019). *Particle density* tercatat 1,769 g/cm³, terpaut jauh di bawah standar rata-rata mineral penyusun tanah (2,65 g/cm³) (Brady & Weil, 2016). Rendahnya massa jenis padatan ini secara intrinsik

mengonfirmasi kontribusi dominan dari fraksi bahan organik bawaan di dalam tanah (Wu dkk., 2022). Interaksi kedua parameter tersebut menghasilkan porositas 41,2%. Meskipun ruang aerasi memadai, kadar air awal yang hanya 4,45% berpotensi membatasi mobilitas unsur. Meskipun porositas tanah tergolong cukup baik, kadar air awal yang relatif rendah menunjukkan bahwa kemampuan tanah dalam mempertahankan air masih dapat ditingkatkan. Oleh karena itu, pengaruh penambahan *biochar* terhadap sifat fisik tanah selanjutnya dievaluasi melalui perubahan parameter hidrolis pada tahap berikutnya (Moradi-choghamarani dkk., 2024).

Dari sisi sifat kimia, tanah awal memiliki pH sebesar 7,45 yang menunjukkan kondisi netral hingga sedikit alkalis. Nilai pH tanah awal menunjukkan kondisi netral hingga sedikit alkalis. Kondisi ini digunakan sebagai kondisi awal penelitian sehingga perubahan pH setelah aplikasi *biochar* dapat diamati dengan lebih jelas. Perubahan tersebut selanjutnya menjadi salah satu faktor yang berperan dalam proses imobilisasi Pb selama masa inkubasi (Guo dkk., 2020).

Parameter *electrical conductivity* (EC) tanah awal berada pada nilai 196 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Angka tersebut merepresentasikan konsentrasi ion terlarut bawaan yang rendah, berada jauh di bawah ambang batas kritis salinitas tanah mineral konvensional, yakni 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pellera dkk., 2021). Nilai tersebut memberikan kondisi awal yang baik untuk mengevaluasi perubahan sifat kimia tanah setelah penambahan *biochar*. Selain itu, EC yang rendah menunjukkan bahwa peningkatan ion mineral akibat aplikasi *biochar* dapat diamati tanpa dipengaruhi oleh salinitas awal tanah yang tinggi (Szostek dkk., 2024).

Penting untuk dicatat bahwa karena matriks dasar ini merupakan sampel tanah pertanian yang subur dan bebas polusi riil, pemodelan polusi logam berat di laboratorium dilakukan secara buatan (*artificial*) menggunakan larutan Timbal nitrat melalui metode *spiking*. Pengondisian buatan ini memicu pergeseran keseimbangan kimia dan fisikokimia tanah

kontrol pasca kontaminasi, yang selanjutnya dievaluasi komparatif bersama dengan varian perlakuan biochar untuk mengkaji efektivitas mekanisme remediasi Pb selama 28 hari masa inkubasi (Guo dkk., 2020).

4.1.2 Karakteristik Bahan Baku *Biochar*

Karakterisasi bahan baku dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia awal *sludge* dan *bagasse* tebu sebelum proses *pyrolysis* dan *co-pyrolysis*. Pengujian meliputi kadar air, ukuran partikel, analisis proksimat (kadar abu, *volatile matter*, dan *fixed carbon*). Data hasil karakterisasi ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Karakteristik Fisikokimia Bahan Baku *Biochar*

Parameter	Sludge	Bagasse
Ukuran Partikel	0,180 cm (60 mesh)	± 2 cm
Kadar Air (%)	75,1	32,8
Kadar Abu (%)	35,6	25,28
<i>Volatile matter</i> (%)	63,1	64,79
Kadar Karbon Tetap (%)	1,3	9,93
pH	9,70	7,18
EC ($\mu\text{S/cm}$)	196	184

4.1.2.1 Kadar Air dan Ukuran Partikel

Berdasarkan Tabel 4.2, *sludge* memiliki kadar air awal yang tinggi (75,1%), berbeda jauh dengan *bagasse* (32,8%). Tingginya kadar air pada *sludge* merupakan karakteristik umum limbah cair yang didominasi oleh air bebas dan air terikat (Zaman dkk., 2017). Dalam proses produksi *biochar*, kadar air bahan baku yang tinggi dapat menjadi kendala. Jika *sludge* langsung dipyrolysis tanpa dikeringkan, sebagian besar energi panas di dalam reaktor akan terserap untuk proses penguapan air. Hal ini dapat menunda laju pemanasan yang dibutuhkan untuk mengurai bahan, sehingga menurunkan efisiensi termal dan memperpanjang waktu proses pengarangan (Nindyapuspa dkk., 2025). Oleh karena itu, tahap pengeringan awal sangat diperlukan.

Selain pengeringan, penyeragaman ukuran juga dilakukan dengan menghaluskan *sludge* menjadi 0,180 cm (60 mesh) dan memotong *bagasse* menjadi ± 2 cm. Penyesuaian ukuran ini bertujuan untuk mengoptimalkan perpindahan panas di dalam reaktor. Partikel yang lebih kecil akan

memperpendek jarak masuknya panas ke bagian dalam bahan. Pemanasan yang merata ini penting untuk memastikan seluruh bahan terkarbonisasi dengan sempurna dan mencegah proses pembakaran yang tidak tuntas (Veiga dkk., 2021). Selain itu, ukuran yang seragam juga memperluas area kontak antar-bahan saat proses ko-pyrolisis berlangsung.

4.1.2.2 Analisis Proximate Bahan Baku

Hasil uji proksimat menunjukkan bahwa *sludge* didominasi oleh komponen mineral anorganik, dengan kadar abu sebesar 35,6% dan karbon tetap sebesar 1,3%. Mineral penyusun abu ini umumnya berasal dari sisa bahan kimia pembeku (koagulan) yang mengendap pada instalasi pengolahan limbah. Angka ini sesuai dengan sifat dasar lumpur limbah yang rata-rata memiliki kadar abu antara 24% hingga 50% (J. Zhang dkk., 2020).

Di sisi lain, *bagasse* tebu didominasi oleh senyawa organik penyusun struktur tumbuhan, yang terlihat dari tingginya persentase zat terbang (*volatile matter*) sebesar 64,79%. Kandungan volatil yang tinggi ini memfasilitasi pelepasan gas pembentuk pori saat pemanasan berlangsung (Zafeer dkk., 2024). Nilai karbon tetap awal *bagasse* sebesar 9,93% juga selaras dengan batasan komparatif literatur biomassa berserat (10%), sehingga material tersebut berpotensi menjadi bahan baku penyedia kerangka karbon tetap (Varma & Mondal, 2017).

Meskipun demikian, kadar abu bawaan pada sampel *bagasse* mencapai 25,28%, lebih tinggi dari nilai umum biomassa murni yang biasanya hanya berkisar 2–5%. Tingginya residu ini menandakan adanya mineral pengotor, seperti partikel tanah atau pasir, yang terbawa saat proses panen di lahan maupun saat penggilingan (Pellera dkk., 2021). Kondisi semacam ini lazim dijumpai pada penelitian berbasis limbah riil (*real waste*) karena penanganan awal di lapangan yang bervariasi.

Adanya mineral pengotor ini memberikan pengaruh yang berbanding terbalik terhadap nilai *volatile matter*. Karena abu tidak menguap menjadi gas saat dipanaskan, keberadaannya secara langsung akan mengurangi persentase berat zat terbang pada sampel uji (Hadey dkk., 2022).

4.1.2.3 Karakteristik Kimia Bahan Baku

Pengujian keasaman menunjukkan bahwa *sludge* bersifat basa (pH 9,70), sedangkan *bagasse* bersifat netral (pH 7,18). Sifat basa pada *sludge* disebabkan oleh tingginya mineral alkali, seperti kalsium dan magnesium, yang terkumpul di dalam abunya. Kondisi ini sejalan dengan karakteristik lumpur buangan industri yang dilaporkan memiliki rentang pH 6,9 hingga 11,2 akibat keberadaan mineral tersebut (Tarelho dkk., 2019).

Sementara itu, *electrical conductivity* (EC) tercatat sebesar 196 $\mu\text{S}/\text{cm}$ untuk *sludge* dan 184 $\mu\text{S}/\text{cm}$ untuk *bagasse*, yang mewakili jumlah ion mineral terlarut. Berdasarkan profil tersebut, terlihat adanya korelasi yang searah semakin tinggi kandungan abu suatu bahan, semakin banyak ion terlarutnya (EC), yang pada akhirnya meningkatkan sifat basanya (pH).

Sifat basa dan mineral bawaan ini sangat berguna untuk proses pemulihan tanah. Sifat basa dari *sludge* berfungsi sebagai bahan pengapur yang mampu meningkatkan pH tanah, sehingga membantu mengendapkan logam berat Timbal (Pb) menjadi bentuk yang tidak larut. Kombinasi mineral dari *sludge* dan bahan organik dari *bagasse* diharapkan saling melengkapi dalam mengikat logam berat melalui pertukaran ion secara kimiawi (Hassan dkk., 2020).

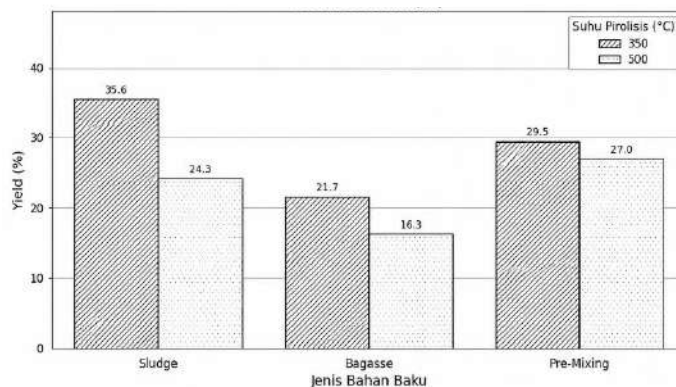
4.2 Karakteristik *Biochar*

Subbab ini membahas karakteristik *biochar* yang dihasilkan pada berbagai variasi suhu dan komposisi bahan. Parameter yang dianalisis meliputi yield *biochar*, analisis proksimat (kadar abu, *volatile matter*, dan *fixed carbon*), serta sifat kimia berupa pH dan *electrical conductivity* (EC). Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kondisi proses terhadap kualitas *biochar* sebagai dasar penentuan *biochar* terbaik.

4.2.1 Randemen (*yield*) *Biochar*

Yield biochar merupakan parameter penting yang menunjukkan efisiensi konversi biomassa menjadi produk padat selama proses *pyrolysis*.

Data *yield biochar* pada berbagai variasi bahan dan suhu ditampilkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Grafik *Yield Biochar*

Data pada Gambar 4.1 merepresentasikan pola penurunan persentase rendemen (*yield*) *biochar* seiring dengan peningkatan suhu *pyrolysis* dari 350°C menjadi 500°C pada seluruh perlakuan. Sebagai contoh, *yield biochar sludge* turun dari 35,6% menjadi 24,3%, sementara *yield biochar bagasse* menyusut dari 21,7% menjadi 16,3%. Penurunan massa padatan ini berkaitan erat dengan reaksi penguraian termal pada komponen organik utama biomassa, khususnya selulosa dan hemiselulosa. Pemanasan konstan memicu volatilisasi senyawa organik menjadi fase cair (*bio-oil/tar*) dan gas tak terkondensasi (*syngas*). Waktu tinggal selama satu jam pada suhu tinggi memberikan paparan panas yang cukup untuk memaksimalkan pelepasan senyawa volatil, yang pada akhirnya mengurangi jumlah residu massa padatan (Zafeer dkk., 2024).

Secara komparatif, *biochar* berbahan dasar *sludge* tunggal secara konsisten menghasilkan rendemen yang lebih tinggi dibandingkan dengan *bagasse* pada kedua variasi suhu pengujian. Perbedaan retensi berat ini bersumber dari karakteristik bawaan bahan baku, terutama dominasi kandungan mineral anorganik (abu) penyusun *sludge*. Berbeda dengan zat organik pada *bagasse* yang rentan mengalami perengkakan termal akibat panas, sebagian besar komponen mineral anorganik dalam lumpur limbah memiliki stabilitas termal yang memadai untuk tidak terurai pada rentang suhu di bawah 600°C. Residu mineral tersebut bertahan sebagai fasa padat inert di

dalam matriks *biochar*, yang secara fisik membatasi laju penyusutan massa secara keseluruhan (Cao dkk., 2024; Veiga dkk., 2021).

Pada sistem *co-pyrolysis* dengan metode pencampuran awal (*pre-mixing*), perolehan rendemen menempati posisi moderat di antara kedua material penyusunnya, yakni sebesar 29,5% pada suhu 350°C dan 27,0% pada suhu 500°C. Selisih penyusutan massa pada material komposit ini hanya sebesar 2,5% saat suhu ditingkatkan, mencerminkan tingkat stabilitas termal yang lebih baik daripada pembakaran masing-masing bahan baku secara terpisah. Retensi massa padatan yang lebih stabil ini secara langsung didasari oleh karakteristik utama dari masing-masing bahan baku penyusun *biochar*.

Perbedaan tersebut diduga berkaitan dengan interaksi antara fraksi mineral pada *sludge* dan komponen organik *bagasse* selama proses *pyrolysis*. Interaksi ini berpotensi memengaruhi jalannya reaksi termokimia sehingga distribusi produk *pyrolysis* menjadi berbeda dibandingkan *pyrolysis* masing-masing bahan secara terpisah. Akibatnya, sebagian karbon dan mineral tetap tertahan dalam fase padat sehingga *yield biochar* yang dihasilkan cenderung lebih tinggi (X. Chen dkk., 2022; J. Zhang dkk., 2020).

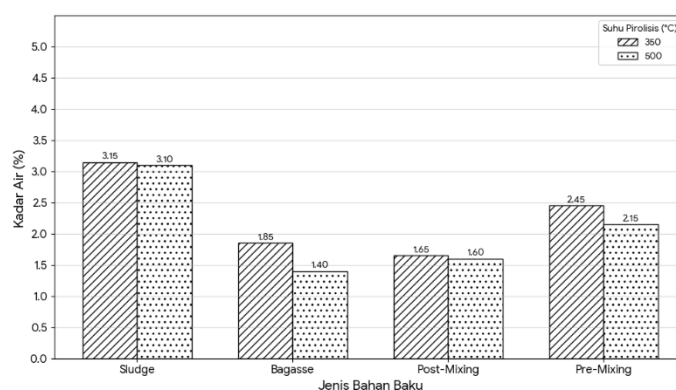
Kecenderungan tersebut juga terlihat pada hasil penelitian ini, di mana *biochar pre-mixing* memiliki *yield* yang lebih tinggi dibandingkan *biochar bagasse* pada kedua suhu *pyrolysis*. Meskipun mekanisme tersebut tidak diamati secara langsung, pola yang diperoleh menunjukkan bahwa kombinasi *sludge* dan *bagasse* melalui proses *co-pyrolysis* berpotensi meningkatkan retensi massa padatan dibandingkan penggunaan *bagasse* sebagai bahan baku tunggal. Temuan ini sejalan dengan (Biney & Gusiatin, 2024), yang menunjukkan bahwa interaksi antarbahan selama *co-pyrolysis* dapat menghasilkan distribusi produk yang berbeda dibandingkan *pyrolysis* biomassa tunggal.

4.2.2 Analisis Proximat *Biochar*

Analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar *biochar* yang meliputi kadar abu, *volatile matter* (VM), dan *fixed carbon* (FC). Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat karbonisasi serta kualitas *biochar* yang dihasilkan pada berbagai variasi suhu *pyrolysis* dan jenis bahan baku.

4.2.2.1 Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter dalam analisis proksimat yang menggambarkan jumlah kelembapan yang masih tersisa atau teradsorpsi kembali pada matriks *biochar* setelah proses *pyrolysis*. Nilai kadar air menjadi indikator penting karena berpengaruh terhadap stabilitas fisik *biochar* selama penyimpanan serta kualitasnya sebagai bahan remediasi tanah. *Biochar* dengan kadar air di bawah 10% umumnya memiliki daya simpan yang lebih baik dan lebih tahan terhadap pelapukan biologis dibandingkan *biochar* dengan kadar air yang lebih tinggi (Hassan dkk., 2020; Peller dkk., 2021).



Gambar 4. 2 Grafik Kadar Air *Biochar*

Berdasarkan Gambar 4.2, kadar air seluruh *biochar* berada pada kisaran 1,40–3,15%, sehingga seluruh perlakuan telah memenuhi kisaran kadar air yang diharapkan untuk aplikasi sebagai remediasi tanah. *Biochar* berbahan baku *sludge* menunjukkan kadar air tertinggi, yaitu 3,15% pada suhu 350 °C dan 3,10% pada suhu 500 °C. Sebaliknya, *biochar bagasse* memiliki kadar air terendah, yaitu 1,85% dan 1,40% pada suhu yang sama. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jenis bahan baku masih memengaruhi

kadar air akhir *biochar* meskipun seluruh sampel diproduksi menggunakan kondisi *pyrolysis* yang sama.

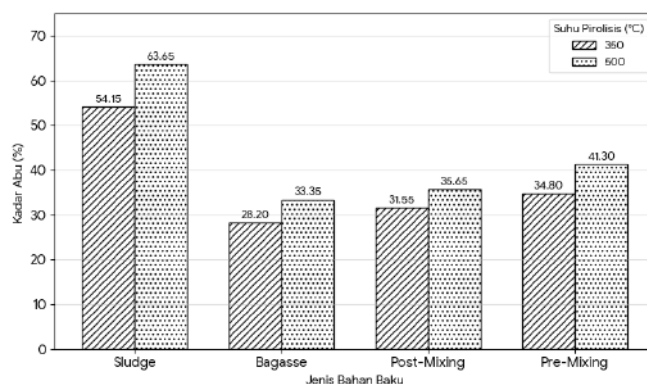
Peningkatan suhu *pyrolysis* dari 350 °C menjadi 500 °C juga diikuti oleh penurunan kadar air pada hampir seluruh perlakuan. Sebagai contoh, kadar air *biochar bagasse* menurun dari 1,85% menjadi 1,40%, sedangkan *biochar pre-mixing* berkurang dari 2,45% menjadi 2,15%. Selama proses pemanasan, sebagian gugus fungsi yang mengandung oksigen mengalami penguraian sehingga jumlah gugus hidroksil (–OH) dan karboksil pada permukaan *biochar* berkurang (S. Wei dkk., 2019). Perubahan tersebut menyebabkan permukaan *biochar* menjadi lebih hidrofobik, sehingga kemampuan mengadsorpsi kelembapan dari udara ikut menurun (Schimmelpfennig & Glaser, 2012).

Biochar komposit, baik yang dihasilkan melalui metode *pre-mixing* maupun *post-mixing*, memiliki kadar air pada kisaran 1,60–2,45%, yaitu berada di antara *biochar sludge* dan *bagasse*. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pencampuran kedua bahan menghasilkan karakteristik yang lebih seimbang dibandingkan penggunaan bahan baku tunggal. Kombinasi fraksi mineral dari *sludge* dan fraksi karbon dari *bagasse* diduga menghasilkan kemampuan mengadsorpsi kelembapan yang berada di antara kedua *biochar* penyusunnya (Zafeer dkk., 2024). Rendahnya kadar air pada seluruh perlakuan juga menunjukkan bahwa *biochar* yang dihasilkan memiliki stabilitas fisik yang baik selama penyimpanan. Kondisi ini berpotensi mengurangi aktivitas mikroorganisme yang memanfaatkan air sebagai media pertumbuhan, sehingga kualitas *biochar* sebagai remediasi tanah dapat lebih terjaga (Hadey dkk., 2022).

4.2.2.2 Kadar Abu (*Ash Content*)

Kadar abu merupakan salah satu parameter dalam analisis proksimat yang menunjukkan jumlah residu mineral anorganik yang tersisa setelah proses *pyrolysis*. Parameter ini penting karena berkaitan dengan sifat kimia *biochar*, terutama kandungan mineral yang dapat memengaruhi pH dan ketersediaan ion ketika *biochar* diaplikasikan ke tanah (Pellera dkk.,

2021). Oleh karena itu, kadar abu digunakan untuk mengevaluasi karakteristik mineral pada *biochar* yang dihasilkan dari berbagai jenis bahan baku.



Gambar 4. 3 Grafik Kadar Abu *Biochar*

Berdasarkan Gambar 4.3, jenis bahan baku memengaruhi akumulasi mineral secara kontras. *Biochar sludge* menghasilkan kadar abu tertinggi (54,14% - 63,65%), sedangkan *biochar bagasse* jauh lebih rendah (28,20% - 33,35%). Tingginya abu *sludge* dipicu oleh akumulasi padatan anorganik dari sisa koagulan pengolahan air limbah. Kecenderungan ini serupa dengan laporan Pelleri dkk. (2021) di mana kadar abu *biochar* lumpur melimpah (>45%), kontras dengan karakteristik residu karbon arang ampas tebu komparasi literatur yang umumnya di bawah 10% karena murni tersusun atas polimer organik makromolekul (Zafeer dkk., 2024).

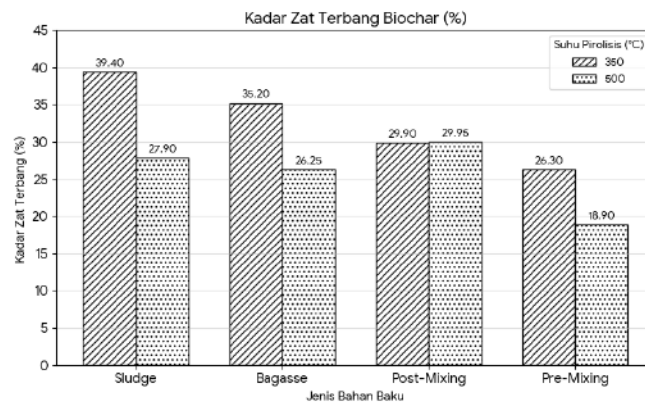
Peningkatan suhu *pyrolysis* dari 350 °C menjadi 500 °C diikuti oleh kenaikan kadar abu pada seluruh perlakuan. Kecenderungan ini terjadi karena semakin banyak fraksi organik yang terurai dan terlepas sebagai senyawa volatil selama proses pemanasan (S. Wei dkk., 2019). Sementara itu, sebagian besar komponen mineral memiliki stabilitas termal yang lebih tinggi sehingga tetap berada di dalam *biochar*. Akibatnya, proporsi mineral di dalam *biochar* menjadi lebih besar meskipun jumlah mineral tersebut tidak selalu bertambah (Tarelho dkk., 2019).

Pada *biochar* komposit, kadar abu berada di antara *biochar sludge* dan *bagasse*, yaitu 31,55–35,65% pada metode *post-mixing* dan 34,80–41,30% pada metode *pre-mixing*. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pencampuran kedua bahan menghasilkan kandungan mineral yang lebih seimbang dibandingkan penggunaan *sludge* sebagai bahan baku tunggal. Fraksi karbon dari *bagasse* menurunkan proporsi mineral yang berasal dari *sludge*, sehingga *biochar* komposit memiliki kadar abu yang berada pada kisaran menengah (J. Zhang dkk., 2020).

Kandungan mineral yang masih cukup tinggi pada *biochar* komposit berpotensi memberikan keuntungan ketika diaplikasikan sebagai remediasi tanah. Mineral anorganik yang tersisa setelah proses *pyrolysis* dapat meningkatkan sifat alkalis *biochar* dan berkontribusi terhadap peningkatan pH tanah (Hassan dkk., 2020). Pada kondisi pH yang lebih tinggi, mobilitas Pb cenderung menurun sehingga ion logam lebih mudah teradsorpsi atau membentuk senyawa dengan kelarutan yang lebih rendah (Guo dkk., 2020). Dengan demikian, kadar abu tidak hanya mencerminkan kandungan mineral *biochar*, tetapi juga menjadi salah satu karakteristik yang mendukung potensinya dalam remediasi tanah tercemar Pb.

4.2.2.3 Kadar Zat Terbang (*Volatile matter*)

Volatile matter (VM) merupakan parameter proksimat yang merepresentasikan fraksi senyawa organik berwujud gas pasca-penguraian termal (Pellera dkk., 2021). Proporsi VM yang rendah menjadi indikator tingginya derajat karbonisasi serta stabilitas fisik *biochar* terhadap risiko pelapukan biologis. Secara visual, profil komparatif hasil karakterisasi VM pada seluruh variasi perlakuan direpresentasikan pada Gambar 4.4. Berdasarkan gambar tersebut, perolehan nilai VM bervariasi secara signifikan bergantung pada jenis bahan baku dan tingkat suhu pemanasan.



Gambar 4. 4 Grafik *Volatile matter Biochar*

Peningkatan suhu *pyrolysis* dari 350 °C menjadi 500 °C secara konsisten memicu penyusutan persentase *volatile matter* (VM) pada seluruh perlakuan. Pada biochar *sludge* tunggal, nilai VM menurun dari 39,39% menjadi 27,90%, sementara pada *bagasse* menyusut dari 35,23% menjadi 26,25% akibat dekomposisi fraksi organik (Veiga dkk., 2021). Tren reduksi kuantitatif zat terbang ini serupa dengan hasil pengujian (Hadey dkk., 2022), di mana arang limbah *pomace* mengalami penurunan kadar VM dari 38,30% menjadi 20,30% seiring peningkatan intensitas termal, mengonfirmasi pelepasan fasa volatil organik yang masif menuju terbentuknya kerangka karbon stabil.

Di sisi lain, *bagasse* secara alami tersusun atas matriks polimer lignoselulosa yang kompleks (Zafeer dkk., 2024). Peningkatan temperatur pemanasan hingga 500°C memicu terjadinya reaksi perengkahan termal (*thermal cracking*), dekarboksilasi, dan dehidrasi pada komponen organik tersebut (Veiga dkk., 2021). Transformasi fisikokimia ini mendorong sebagian besar elemen volatil terlepas ke dalam fase gas. Proses devolatilisasi fasa organik tersebut menyisakan struktur matriks karbon yang lebih terkonsentrasi pada residu padat akhir *biochar* (Hadey dkk., 2022).

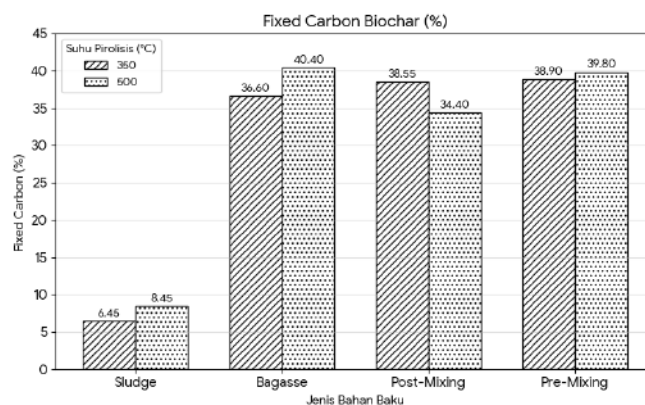
Varian komposit menunjukkan variasi data yang berbeda, di mana metode *pre-mixing (co-pyrolysis)* pada suhu 500 °C menghasilkan kadar VM terendah secara signifikan yaitu 18,89%. Minimumnya zat terbang ini

membuktikan terjadinya interaksi termokimia sinergis melalui reaksi penyilangan (*cross-linking*) antara radikal bebas *sludge* dan ampas tebu (Mohamed dkk., 2023). Sebagai pembandingan, J. Zhang dkk. (2020) mencatat nilai serupa pada *co-pyrolysis sewage sludge* dengan sekam padi yang menghasilkan VM sebesar 23,10%, membuktikan fasa mineral alkali lumpur aktif efektif mengunci sebagian komponen volatil intermediet hasil perengkahan biomassa ke dalam fasa arang padat sekunder.

Ditinjau dari fungsionalitas remediasi tanah, proporsi VM yang rendah memberikan keuntungan teknis dalam proses remediasi. Hilangnya fraksi volatil membuka jaringan pori-pori internal (mikropori dan mesopori) pada struktur karbon. Ekspansi ruang pori tersebut menyediakan luas area adsorpsi yang lebih besar untuk meningkatkan retensi air sekaligus memaksimalkan penjeratan ion logam berat Timbal (Pb) di dalam matriks tanah (Kumar & Bhattacharya, 2021).

4.2.2.4 Kadar Karbon Tetap (*Fixed carbon*)

Kadar karbon tetap (*fixed carbon/FC*) merepresentasikan fraksi karbon padat yang stabil dan sukar terurai sebagai residu pasca penguraian termal. Parameter ini menjadi indikator utama kualitas material karena persentase karbon yang tinggi berkorelasi dengan ketahanan fisik *biochar* terhadap pelapukan biologis dan oksidasi kimiawi (Kumar & Bhattacharya, 2021; S. Wei dkk., 2019). Berdasarkan perolehan persentase karbon tetap menempati rentang yang bervariasi bergantung pada formulasi bahan baku penyusun serta tingkat suhu pemanasannya. Profil komparatif hasil karakterisasi *fixed carbon* pada seluruh variasi perlakuan tersebut secara visual direpresentasikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Grafik Kadar Karbon Tetap *Biochar*

Biochar bagasse suhu 500°C mencatatkan nilai karbon tetap tertinggi sebesar 40,40%. Sebaliknya, *biochar sludge* menghasilkan residu jauh lebih rendah (6,45%–8,45%). Perbedaan ini bersumber dari sifat bawaan materialnya. Serat *bagasse* tersusun atas polimer lignoselulosa kompleks, di mana lignin dengan cincin aromatiknya menjadi penyedia kerangka utama karbon saat *pyrolysis* (Veiga dkk., 2021). Di sisi lain, lumpur limbah (*sludge*) didominasi mineral anorganik dan senyawa volatil berantai pendek, sehingga kekurangan komponen pembentuk kerangka karbon padat (Cao dkk., 2024).

Berdasarkan Gambar 4.5, nilai karbon tetap tertinggi dicapai oleh *biochar bagasse* murni suhu 500 °C sebesar 40,40%, sedangkan *biochar sludge* tunggal menghasilkan residu karbon yang jauh lebih rendah pada rentang 6,45%–8,45%. Perbedaan masif ini dikendalikan oleh komposisi struktural bahan baku fasa awal, di mana ampas tebu didominasi matriks polimer lignoselulosa yang kaya akan unsur karbon aromatik alami (Veiga dkk., 2021). Sebaliknya, *sludge* didominasi oleh fraksi padatan mineral anorganik pembentuk abu (Cao dkk., 2024). Capaian tinggi pada komponen tebu ini sejalan dengan data Moradi-Choghamarani dkk. (2024) yang mencatatkan kadar karbon tetap sebesar 46,70% pada arang biomassa sejenis.

Suhu *pyrolysis* turut mengendalikan persentase akhir *fixed carbon*. Peningkatan suhu dari 350°C menjadi 500°C konsisten memicu

peningkatan nilai karbon tetap pada hampir seluruh perlakuan. Secara termokimia, pemanasan tinggi mempercepat pemecahan ikatan tak stabil, mendorong pelepasan oksigen dan hidrogen menjadi gas (Hassan dkk., 2020). Kondisi ini memaksa atom karbon tersisa saling merapat dan menyusun ulang ikatannya. Struktur karbon memadat membentuk cincin poliaromatik menyerupai lapisan grafit, menghasilkan *biochar* yang lebih pekat dan stabil (S. Wei dkk., 2019).

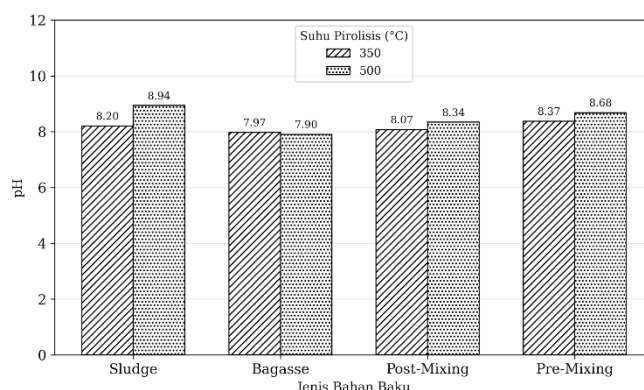
Metode pencampuran material menentukan tingkat penyimpanan karbon komposit. *Co-pyrolysis (pre-mixing)* suhu 500°C mempertahankan kadar karbon tetap hingga 39,84%. Sebaliknya, perlakuan *post-mixing* hanya mencatatkan 38,51% (350°C) dan menyusut ke 34,39% (500°C). Tingginya karbon pada *pre-mixing* didasari interaksi termokimia langsung selama pemanasan. Radikal bebas dari *sludge* bereaksi saling silang (*cross-linking*) dengan matriks lignin *bagasse* (X. Chen dkk., 2022). Penggabungan ini efektif mengunci karbon organik menjadi jaringan padat baru dan mencegahnya terlepas sebagai gas (Mohamed dkk., 2023).

Ditinjau dari fungsi remediasi, tingginya *fixed carbon* pada *biochar* komposit menunjang stabilitas fisik jangka panjang di lingkungan (S. Wei dkk., 2019). Kerangka karbon stabil lebih tahan terhadap penguraian biologis dan perubahan lingkungan dibandingkan karbon labil (Hadey dkk., 2022). Ketahanan ini menjaga struktur pori internal tetap kokoh, sehingga fungsi penyerapannya bertahan lama (Guo dkk., 2020). Kondisi struktural ini mendukung proses imobilisasi logam berat berkelanjutan karena situs adsorpsi tetap optimal menahan pergerakan ion timbal (Pb) di tanah (Imran dkk., 2025).

4.2.2.5 Derajat Keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) merupakan parameter kimia penentu kelayakan *biochar* sebagai pembenah tanah (*soil ameliorant*) (Pellera dkk., 2021). Hasil pengujian menunjukkan seluruh variasi *biochar* bersifat alkalis dengan rentang pH 7,90 hingga 8,94. Profil perbandingan hasil karakterisasi pH pada setiap sampel secara visual ditampilkan pada Gambar 4.6. Secara

umum, *biochar sludge* tunggal mencatatkan kebasaan tertinggi hingga 8,94 (suhu 500°C), sedangkan *biochar* ampas tebu (*bagasse*) berada pada rentang netral alkalis yang lebih rendah (pH 7,90–7,97).



Gambar 4. 6 Grafik pH *Biochar*

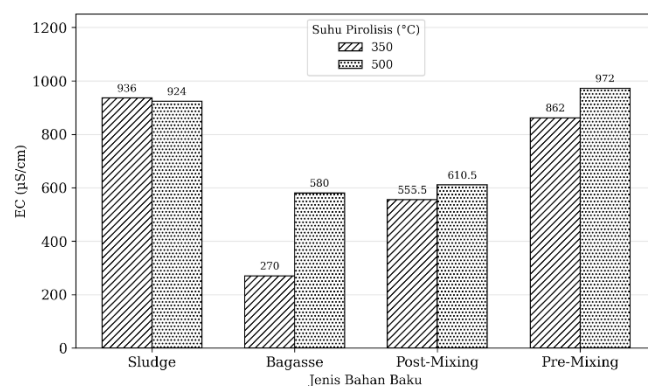
Perbedaan tingkat kebasaan ini berkaitan erat dengan karakteristik bawaan bahan baku. Tingginya pH pada *biochar sludge* berbanding lurus dengan tingginya kadar abu yang tersisa pasca-*pyrolysis*. Lumpur limbah umumnya menahan sisa padatan anorganik serta bahan kimia koagulan dari proses pengolahan air limbah (Cao dkk., 2024). Mineral anorganik bawaan tersebut kebal terhadap panas (*inert*), sehingga ketika fraksi karbon organik terbakar dan menguap, residu mineral ini semakin terkonsentrasi di dalam matriks abu dan memberikan sumbangan sifat basa pada produk akhir (Hassan dkk., 2020; Tarelho dkk., 2019).

Selain faktor bahan, peningkatan suhu *pyrolysis* dari 350°C menjadi 500°C secara konsisten mendorong kenaikan pH pada seluruh sampel. Pemanasan suhu tinggi memicu reaksi dekarboksilasi dan dehidrasi yang lebih intensif pada matriks material (Hassan dkk., 2020). Reaksi termokimia ini melepaskan komponen asam organik serta memutus gugus fungsi beroksigen penyumbang ion hidrogen (proton). Kehilangan komponen asam yang menguap menjadi gas tersebut secara otomatis menggeser keseimbangan sifat kimia *biochar* menjadi semakin alkalis (Pellera dkk., 2021).

Ditinjau dari fungsi remediasi, sifat alkalis *biochar* memberikan keuntungan teknis berupa efek pengapuran (*liming effect*). Saat diaplikasikan pada tanah tercemar, *biochar* akan meningkatkan derajat keasaman lingkungan di sekitarnya. Kondisi basa ini memfasilitasi ion logam berat timbal (Pb) untuk mengendap melalui mekanisme presipitasi kimiawi. Pembentukan endapan sekunder yang stabil ini efektif mencegah kontaminan kembali melarut ke dalam larutan tanah, sehingga memutus risiko penyerapannya oleh sistem perakaran tanaman (Guo dkk., 2020; Mohamed dkk., 2023).

4.2.2.6 *Electrical Conductivity (EC)*

Electrical conductivity (Electrical Conductivity/EC) bertindak sebagai parameter pendamping untuk mengukur total konsentrasi ion terlarut di dalam jaringan pori material. Serupa dengan tren pada pengujian keasaman, perolehan nilai EC memperlihatkan selisih yang lebar berdasarkan komposisi bahan mentahnya. Profil visual hasil karakterisasi EC dari setiap variasi perlakuan ditampilkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Grafik EC *Biochar*

Berdasarkan Gambar 4.6, jenis bahan baku menentukan nilai EC *biochar* secara signifikan. *Biochar sludge* tunggal menunjukkan kapasitas hantar listrik tertinggi, meskipun sedikit menurun dari 936 µS/cm (350 °C) menjadi 924 µS/cm (500 °C) akibat kristalisasi mineral fasa lanjut. Sebaliknya, *biochar bagasse* murni mengalami kenaikan EC yang besar dari 270 µS/cm menjadi 580 µS/cm seiring naiknya suhu. Tren kenaikan EC

pada biomassa lignoselulosa ini serupa dengan temuan Peller dkk. (2021), di mana nilai EC meningkat dari 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ke 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ akibat dekomposisi senyawa organik yang mengonsentrasikan ion kalium dan kalsium terlarut.

Profil EC pada spesimen komposit memperlihatkan perbedaan karakteristik yang dipengaruhi oleh metode preparasi. Nilai EC pada metode *post-mixing* meningkat dari 555,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ke 610,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mencerminkan kontribusi aditif fisik antar-komponen tunggal. Sementara itu, varian *pre-mixing* (*co-pyrolysis*) menunjukkan lonjakan EC dari 862 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hingga mencapai 972 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada suhu 500 °C, melampaui nilai *sludge* tunggal akibat interaksi termokimia yang melepaskan ion. Sebagai komparasi, Zhang dkk. (2020) melaporkan nilai EC *co-pyrolysis* lumpur limbah mencapai 910 $\mu\text{S}/\text{cm}$ akibat terbentuknya fasa garam mineral baru yang lebih mudah larut.

Penting untuk dicatat bahwa meskipun terjadi pelepasan ion yang signifikan, akumulasi nilai EC pada seluruh perlakuan tetap terkendali di bawah ambang batas salinitas tanah (*non-saline*), yakni di bawah 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ atau 1 dS/m (Szostek dkk., 2024). Dengan demikian, peningkatan EC pada studi ini murni merepresentasikan pemulihan unsur hara dan suplai mineral fungsional bagi tanah, sehingga tidak akan memicu stres osmotik atau hambatan pertumbuhan bagi perakaran tanaman.

4.2.3 Analisis Statistik Karakteristik *Biochar*

Analisis statistik parametrik digunakan untuk mengevaluasi pengaruh komposisi bahan baku dan suhu *pyrolysis* terhadap karakteristik *biochar*. Pengaruh kedua faktor tersebut dianalisis menggunakan *Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA) dua arah karena penelitian melibatkan beberapa variabel respon yang diamati secara bersamaan. Sebelum pengujian MANOVA dilakukan, data terlebih dahulu diuji terhadap asumsi normalitas dan homogenitas varians untuk memastikan kesesuaian penggunaan metode parametrik. Hasil pengujian asumsi digunakan sebagai dasar dalam menentukan validitas model statistik yang diterapkan (Adebayo & Loko, 2024;

Nurhaswinda dkk., 2026). Seluruh proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS Statistics.

4.2.3.1 Uji Normalitas Data *Biochar*

Uji normalitas merupakan prasyarat fundamental dalam analisis statistik parametrik untuk memvalidasi kelayakan sebaran data (Nurhaswinda dkk., 2026). Pengujian ini difokuskan secara eksklusif pada variabel terikat yang diukur dengan skala kontinu, yaitu karakteristik fisikokimia *biochar*. Variabel bebas dalam eksperimen (jenis bahan baku dan suhu pemanasan) merupakan data kategorikal, sehingga secara matematis tidak terikat pada asumsi dasar sebaran kurva normal (Kim & Park, 2019). Pemenuhan asumsi kelayakan ini krusial untuk meminimalkan distorsi rasio kesalahan (*Type I error rate*) dan menjaga akurasi inferensial (Ergin & Koşkan, 2024).

Evaluasi normalitas pada data karakterisasi diaplikasikan melalui metode Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk. Mengingat ukuran sampel observasi berskala terbatas ($n = 16$), validasi signifikansi secara eksklusif difokuskan pada luaran Shapiro-Wilk. Secara empiris, metode ini terbukti memiliki kekuatan statistik (*statistical power*) tertinggi dalam mendeteksi deviasi distribusi pada sampel berukuran kecil (Ahadi & Zain, 2023). Sebaliknya, performa uji Kolmogorov-Smirnov cenderung kurang presisi untuk memetakan sampel terbatas (Wara dkk., 2025). Observasi dinyatakan terdistribusi normal apabila nilai probabilitas (*p-value*) melampaui batas 0,05. Rangkuman signifikansi normalitas direpresentasikan pada Tabel 4.3.

Hasil pengujian normalitas untuk parameter kualitas *biochar* dirangkum dalam Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4. 3 Uji Normalitas Variabel Terikat berdasarkan *Biochar*

Variabel Terikat	<i>Kolgomorov-Smirnov</i>				<i>Shapiro-Wilk</i>			
	Statistik	df	Sig.	Keterangan	Statistik	df	Sig.	Keterangan
Kadar Air	0,165	16	0,200	Data Normal	0,882	16	0,042	Data Tidak Normal

Variabel Terikat	<i>Kolgomorov-Smirnov</i>				<i>Shapiro-Wilk</i>			
	Statistik	df	Sig.	Keterangan	Statistik	df	Sig.	Keterangan
Kadar Abu	0,253	16	0,007	Data Tidak Normal	0,832	16	0,007	Data Tidak Normal
Volatile Matter	0,118	16	0.200	Data Normal	0,964	16	0,738	Data Normal
Fixed carbon	0,343	16	0.000	Data Tidak Normal	0,752	16	0,001	Data Tidak Normal
pH	0,115	16	0,200	Data Normal	0,933	16	0,274	Data Normal
EC	0,226	16	0,28	Data Normal	0,857	16	0,18	Data Normal

Berdasarkan Tabel 4.3, parameter *volatile matter*, derajat keasaman (pH), dan *electrical conductivity* (EC) memenuhi asumsi distribusi normal karena signifikansinya melampaui 0,05. Sebaliknya, kadar air, kadar abu, dan *fixed carbon* menghasilkan probabilitas di bawah batas penerimaan. Pada ukuran sampel terbatas, uji Shapiro-Wilk rentan menolak asumsi normalitas secara prematur akibat sensitivitasnya terhadap fluktuasi minor (Biu dkk., 2020). Guna mengatasi batasan matematis tersebut, evaluasi sebaran data dilanjutkan dengan analisis rasio *skewness* dan *kurtosis* untuk mengukur penyimpangan aktual secara lebih representatif (Mishra dkk., 2019).

Hasil analisis deskriptif skewness dan kurtosis untuk seluruh data (N = 16) ditampilkan dalam Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4. 4 Analisis *Skewness* dan *Kurtosis* Karakteristik *Biochar*

Variabel Terikat	N	<i>Skewness</i>			<i>Kurtosis</i>			Keterangan
		Statistik	Std. Error	Rasio	Statistik	Std. Error	Rasio	
Kadar Air	16	0,526	0,564	0,93	-1,255	1,091	-1,15	Data Normal
Kadar Abu	16	1,099	0,564	1,948	-97	1,091	-0,88	Data Normal

Variabel Terikat	N	<i>Skewness</i>			<i>Kurtosis</i>			Keterangan
		Statistik	Std. Error	Rasio	Statistik	Std. Error	Rasio	
Volatile Matter	16	-0,55	0,564	-0,97	-266	1,091	-0,243	Data Normal
<i>Fixed carbon</i>	16	-1,089	0,564	-1,930	-525	1,091	-0,481	Data Normal
pH	16	0,417	0,564	0,739	-927	1,091	-0,850	Data Normal
EC	16	-0,572	0,564	-1,014	-816	1,091	-0,747	Data Normal

Evaluasi lanjutan terhadap distribusi data dilakukan dengan mengonversi nilai *skewness* dan *kurtosis* menjadi *Z-score*. Rasio ini diperoleh dengan membagi koefisien statistik masing-masing parameter dengan nilai *standard error*-nya. Berdasarkan Tabel 4.4, seluruh variabel terikat memiliki rasio yang berada di dalam ambang batas toleransi -1,96 hingga +1,96. Kondisi ini mengonfirmasi bahwa parameter yang sebelumnya terindikasi asimetris oleh uji Shapiro-Wilk pada dasarnya masih mempertahankan bentuk sebaran yang representatif terhadap kurva normal (Mishra dkk., 2019). Proporsi matematis ini memastikan sampel observasi terbebas dari penyimpangan struktural ekstrem.

Pemenuhan asumsi normalitas secara komprehensif pada matriks data menjamin bahwa pengujian analitik lanjutan terhindar dari risiko distorsi rasio kesalahan (*error rate*) (Nurhaswinda dkk., 2026). Kelayakan distribusi ini memfasilitasi eksekusi prosedur analisis varians multivariat (MANOVA dua arah) secara optimal dan valid. Kesesuaian prasyarat fundamental ini memberikan kepastian bahwa kesimpulan yang akan dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang dapat dipertanggungjawabkan secara statistik.

4.2.3.2 Uji Homogenitas Varians *Biochar*

Uji homogenitas varians merupakan tahapan evaluasi prasyarat statistik sebelum analisis parametrik multivariat diaplikasikan. Langkah ini mendasar dalam memastikan ragam data pada setiap kelompok kombinasi perlakuan bersifat seragam (Adebayo & Loko, 2024). Pemenuhan asumsi ini diperlukan dalam model *Two-Way Multivariate Analysis of Variance* (Two-Way MANOVA) untuk menjamin keandalan pengujian inferensial. Deviasi keseragaman varians yang terlalu besar berpotensi mengganggu akurasi pengujian hipotesis serta mendistorsi interpretasi profil karakteristik *biochar* yang diteliti.

Secara metodologis, kesamaan matriks varians-kovarians pada MANOVA dapat dievaluasi melalui *Box's M Test*. Kendati demikian, pengujian tersebut cenderung sensitif terhadap ukuran sampel kecil dan penyimpangan normalitas (Adebayo & Loko, 2024). Keterbatasan jumlah replikasi pada setiap kombinasi perlakuan berisiko menghasilkan keputusan statistik yang kurang stabil. Oleh sebab itu, pengujian dialihkan menggunakan *Levene's Test* untuk meninjau kesamaan varians secara individual pada tiap variabel terikat (He dkk., 2024). Pendekatan univariat ini terbukti lebih tangguh (*robust*) dalam mempertahankan kestabilan probabilitas kesalahan statistik pada ukuran sampel terbatas (Ergin & Koşkan, 2024)

Prosedur *Levene's Test* dijalankan dengan metode *Levene Statistic* berbasis nilai rata-rata (*based on mean*) pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Kriteria homogenitas terpenuhi apabila nilai signifikansi (*p-value*) lebih besar dari 0,05 (Demir, 2022). Sebaliknya, data dikategorikan tidak homogen jika *p-value* kurang dari 0,05. Parameter yang dievaluasi mencakup kadar air, kadar abu, *volatile matter*, *fixed carbon*, derajat keasaman (pH), dan *electrical conductivity* (EC).

Kriteria pengambilan keputusan adalah sebagai berikut:

Jika nilai signifikansi (Sig.) > 0,05, maka data dinyatakan homogen.

Jika nilai signifikansi (Sig.) < 0,05, maka data dinyatakan tidak homogen.

Tabel 4. 5 Hasil Uji *Homogenitas Metode Levene*

No	Variabel Terikat	Variabel Bebas	Levene Statistic Sig.	Keterangan
1	Kadar Air	Jenis <i>Biochar</i>	0,000	Data Tidak Homogen
		Suhu <i>Pyrolysis</i>	0,822	Homogen
2	Kadar Abu	Jenis <i>Biochar</i>	0,003	Data Tidak Homogen
		Suhu <i>Pyrolysis</i>	0,629	Homogen
3	Volatile Matter	Jenis <i>Biochar</i>	0,011	Data Tidak Homogen
		Suhu <i>Pyrolysis</i>	0,928	Homogen
4	<i>Fixed carbon</i>	Jenis <i>Biochar</i>	0,075	Homogen
		Suhu <i>Pyrolysis</i>	0,876	Homogen
5	Derajat Keasaman	Jenis <i>Biochar</i>	0,000	Data Tidak Homogen
		Suhu <i>Pyrolysis</i>	0,108	Homogen
6	Konduktivitas	Jenis <i>Biochar</i>	0,000	Data Tidak Homogen
		Suhu <i>Pyrolysis</i>	0,053	Homogen

Hasil pengujian Levene Statistic pada Tabel 4.5 menunjukkan bahwa varians data parameter *fixed carbon* bersifat homogen, baik berdasarkan pengelompokan jenis *biochar* ($p = 0,075$) maupun suhu *pyrolysis* ($p = 0,876$). Sebaliknya, parameter kadar air, kadar abu, *volatile matter*, derajat keasaman (pH), dan *electrical conductivity* (EC) menunjukkan perbedaan varians terhadap faktor jenis *biochar* ($p < 0,05$). Meskipun demikian, seluruh parameter tersebut memenuhi kriteria homogenitas apabila ditinjau berdasarkan faktor suhu *pyrolysis*, yang ditunjukkan oleh nilai signifikansi lebih besar dari 0,05.

Ketidakhomogenan varians yang ditemukan pada faktor jenis *biochar* tidak secara otomatis menggugurkan validitas analisis lanjutan. Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan seimbang (*balanced design*), yaitu jumlah replikasi yang sama pada setiap kombinasi perlakuan. Kondisi tersebut diketahui mampu meningkatkan ketahanan (*robustness*) analisis varians terhadap pelanggaran asumsi homogenitas sehingga pengaruh heterogenitas varians terhadap peningkatan kesalahan Tipe I dapat diminimalkan (Ergin & Koşkan, 2024). Oleh karena itu, analisis parametrik masih dapat dilanjutkan dengan tingkat keandalan yang memadai.

Sebagai langkah antisipatif terhadap adanya pelanggaran asumsi homogenitas, interpretasi hasil *Two-Way MANOVA* pada penelitian ini diprioritaskan menggunakan statistik *Pillai's Trace* dibandingkan *Wilks' Lambda*. Pendekatan ini dipilih karena *Pillai's Trace* memiliki tingkat ketahanan yang lebih tinggi terhadap pelanggaran asumsi homogenitas varians-kovarians serta lebih stabil ketika data menunjukkan penyimpangan dari kondisi ideal (Adebayo & Loko, 2024; He dkk., 2024). Oleh karena itu, penggunaan *Pillai's Trace* diharapkan mampu menghasilkan interpretasi yang lebih reliabel dalam mengevaluasi pengaruh jenis *biochar*, suhu *pyrolysis*, serta interaksi keduanya terhadap karakteristik fisikokimia *biochar* yang diteliti.

4.2.3.3 Uji Multivariate Analysis of Variance (MANOVA)

Data penelitian telah memenuhi asumsi normalitas sebagai prasyarat utama analisis parametrik multivariat. Pemenuhan asumsi ini penting untuk memastikan estimasi parameter dan pengujian hipotesis dilakukan secara akurat serta meminimalkan potensi bias statistik (Ahadi & Zain, 2023). Selain itu, distribusi data yang mendekati normal meningkatkan reliabilitas interpretasi pengaruh perlakuan terhadap variabel terikat yang diamati (Wara dkk., 2025). Hasil uji homogenitas menunjukkan bahwa beberapa variabel belum sepenuhnya memenuhi asumsi kesamaan varians antar kelompok perlakuan.

Meskipun demikian, kondisi tersebut masih dapat ditoleransi karena penelitian ini menggunakan rancangan percobaan seimbang (*balanced design*), yaitu jumlah replikasi yang sama pada setiap kombinasi perlakuan. Rancangan yang seimbang diketahui mampu meningkatkan ketahanan (*robustness*) analisis parametrik terhadap pelanggaran homogenitas sehingga risiko kesalahan Tipe I dapat diminimalkan (Ergin & Koşkan, 2024). Selain itu, ukuran sampel yang relatif terbatas pada penelitian eksperimental sering menyebabkan pengujian homogenitas menjadi lebih sensitif terhadap variasi data (Biu dkk., 2020).

Sebagai langkah mitigasi, interpretasi hasil *MANOVA* diprioritaskan menggunakan statistik *Pillai's Trace* yang memiliki tingkat ketahanan lebih tinggi dibandingkan *Wilks' Lambda* ketika asumsi homogenitas tidak sepenuhnya terpenuhi (Adebayo & Loko, 2024)). Dengan demikian, hasil analisis multivariat tetap dapat diinterpretasikan secara valid dan reliabel (Mishra dkk., 2019). Model *Two-Way MANOVA* digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi bahan baku, suhu *pyrolysis*, dan interaksi keduanya terhadap karakteristik fisikokimia *biochar* pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Hasil pengujiannya disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Uji Signifikansi Multivariat (*Multivariate Tests*)

Efek Perlakuan	Uji Statistik	Nilai Sig.	Keterangan
Variasi Bahan	<i>Pillai's Trace</i>	0,001	Berpengaruh Signifikan
Suhu <i>Pyrolysis</i>	<i>Pillai's Trace</i>	0,000	Berpengaruh Signifikan
Interaksi (Bahan * Suhu)	<i>Pillai's Trace</i>	0,006	Berpengaruh Signifikan

Berdasarkan Tabel 4.6, faktor variasi bahan baku *biochar* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik fisikokimia *biochar* secara simultan dengan nilai signifikansi sebesar 0,001 ($p < 0,05$). Faktor suhu *pyrolysis* juga menunjukkan pengaruh yang signifikan dengan nilai signifikansi sebesar 0,000 ($p < 0,05$). Selain itu, interaksi antara variasi bahan baku dan suhu *pyrolysis* menghasilkan nilai signifikansi sebesar

0,006 ($p < 0,05$), yang menunjukkan bahwa respons karakteristik *biochar* terhadap perubahan suhu dipengaruhi oleh jenis bahan baku yang digunakan.

Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kualitas *biochar* tidak hanya ditentukan oleh faktor tunggal bahan baku maupun suhu *pyrolysis*, tetapi juga oleh kombinasi keduanya. Dengan demikian, karakteristik *biochar* yang dihasilkan merupakan hasil interaksi antara komposisi awal bahan baku dan transformasi termokimia yang terjadi selama proses *pyrolysis*. Untuk mengetahui parameter mana yang secara spesifik dipengaruhi oleh masing-masing faktor perlakuan, dilakukan analisis lanjutan menggunakan uji univariat *Tests of Between-Subjects Effects*.

Tabel 4. 7 Hasil Uji Signifikansi Individual

Variabel Terikat	Pengaruh Variasi Bahan	Keterangan	Pengaruh Suhu <i>Pyrolysis</i>	Keterangan	Pengaruh Interaksi	Keterangan
Kadar Air	0,000	Signifikan	0,000	Signifikan	0,003	Signifikan
Kadar Abu	0,000	Signifikan	0,000	Signifikan	0,023	Signifikan
Volatile Matter	0,004	Signifikan	0,001	Signifikan	0,107	Tidak Signifikan
Fixed carbon	0,000	Signifikan	0,683	Tidak Signifikan	0,436	Tidak Signifikan
pH	0,000	Signifikan	0,000	Signifikan	0,002	Signifikan
EC	0,000	Signifikan	0,000	Signifikan	0,000	Signifikan

Hasil uji univariat pada Tabel 4.7 menunjukkan bahwa variasi bahan baku berpengaruh signifikan terhadap seluruh parameter karakteristik *biochar* yang diamati. Temuan ini mengindikasikan bahwa sifat fisikokimia *biochar* sangat ditentukan oleh karakteristik awal bahan baku, termasuk kandungan bahan organik, mineral, dan unsur penyusunnya. Perbedaan komposisi tersebut menghasilkan karakteristik *biochar* yang berbeda secara

nyata pada setiap jenis bahan baku yang digunakan (Hassan dkk., 2020; Tomczyk dkk., 2020)

Selain faktor bahan baku, suhu *pyrolysis* juga memberikan pengaruh signifikan terhadap kadar air, kadar abu, *volatile matter*, pH, dan *electrical conductivity* (EC) (He dkk., 2024). Namun, suhu *pyrolysis* tidak berpengaruh nyata terhadap *fixed carbon* ($p = 0,683$). Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu dari 350°C menjadi 500°C belum mampu menghasilkan perubahan kandungan karbon tetap yang signifikan pada *biochar* yang dihasilkan (S. Wei dkk., 2019; J. Zhang dkk., 2020).

Interaksi antara variasi bahan baku dan suhu *pyrolysis* terbukti berpengaruh signifikan terhadap kadar air ($p = 0,003$), kadar abu ($p = 0,023$), pH ($p = 0,002$), dan *electrical conductivity* ($p = 0,000$), sehingga respons parameter tersebut terhadap suhu bergantung pada jenis bahan baku yang digunakan (Cao dkk., 2024; Pelleri dkk., 2021). Sebaliknya, interaksi kedua faktor tidak berpengaruh nyata terhadap *volatile matter* ($p = 0,107$) dan *fixed carbon* ($p = 0,436$). Secara keseluruhan, bahan baku merupakan faktor yang paling dominan dalam menentukan karakteristik *biochar*, sehingga optimasi kualitas *biochar* perlu mempertimbangkan kombinasi bahan baku dan suhu *pyrolysis* yang tepat (Hassan dkk., 2020; He dkk., 2024).

4.2.3.4 Pengaruh Variabel terhadap Karakteristik *Biochar*

Hasil analisis multivariat membuktikan bahwa suhu *pyrolysis* dan bahan baku secara simultan mendikte profil fisikokimia *biochar* (Sig. 0,000). Peningkatan paparan termal dari 350°C ke 500°C terbukti mempercepat dekomposisi volatil, memicu laju dehidrogenasi, dan mendeoksigenasi matriks karbon (Adebayo & Loko, 2024; Hassan dkk., 2020). Intensitas panas mereduksi persentase *volatile matter* secara tajam menjadi 25,74%, sekaligus memusatkan residu mineral basa pada fasa padat. Pemusatan tersebut secara logis mendongkrak rata-rata kadar abu hingga 43,49% dan meningkatkan alkalinitas produk menjadi pH 8,47 (Tarelho dkk., 2019).

Uji univariat mengonfirmasi bahwa pergeseran suhu tidak memberikan intervensi signifikan terhadap kuantitas *fixed carbon* (Sig. 0,683). Tidak ditemukannya perubahan yang signifikan pada parameter ini menunjukkan bahwa proses pemadatan karbon stabil telah mencapai kondisi yang relatif konstan. Dalam kondisi tersebut, pengaruh karakteristik intrinsik bahan baku menjadi faktor yang lebih dominan dalam menentukan nilai *fixed carbon*. *Biochar bagasse* murni menghasilkan kandungan *fixed carbon* tertinggi sebesar 38,30% (Sig. 0,000), yang mengindikasikan kemampuan biomassa lignoselulosa dalam mempertahankan fraksi karbon stabil selama proses *pyrolysis*. Karakteristik tersebut menjadikan *biochar bagasse* berpotensi mendukung sekuestrasi karbon jangka panjang di dalam tanah (S. Wei dkk., 2019).

Dekomposisi termal pada lumpur limbah menyisakan karakteristik berupa tumpukan abu anorganik mencapai 58,88%. Tingginya konsentrasi mineral bawaan *sludge* ini terekam jelas pada lonjakan tajam *electrical conductivity* sebesar 938,5 $\mu\text{S/cm}$ dan nilai pH 8,58. Komposisi garam basa terlarut yang melimpah ini secara teoritis mengonfigurasi *biochar sludge* sebagai agen pengapuran mumpuni. Material ini mampu mendongkrak pH tanah tercemar sekaligus bertindak sebagai penyedia kation unsur hara esensial guna memulihkan tingkat kesuburan lahan yang telah terdegradasi akibat paparan logam berat (Cao dkk., 2024; Wigan, 2023).

Di luar variabel suhu dan bahan mentah, rekayasa pencampuran material turut mengeksekusi peran krusial. Evaluasi komparasi ganda membuktikan bahwa metode *co-pyrolysis (pre-mixing)* beroperasi lebih superior dibandingkan pencampuran fisik pasca-bakar (*post-mixing*). Interaksi termokimia antara komponen lignoselulosa *bagasse* dan mineral lumpur memicu reaksi penyilangan yang sukses menahan pelepasan gas. Mekanisme ini menghasilkan penyusutan *volatile matter* terendah hingga 18,89% secara signifikan. Fusi termal tersebut memfasilitasi pembentukan kerangka struktural *biochar* dengan tingkat aromatisitas tinggi dan mobilitas logam yang lebih rendah (X. Chen dkk., 2022; Mohamed dkk., 2023).

Sinergi molekuler pada metode *pre-mixing* suhu 500°C berhasil mengunci stabilitas cincin aromatik dengan mempertahankan kadar *fixed carbon* setinggi 39,84%. Persentase ini secara statistik menyamai kemurnian *bagasse*, membuktikan bahwa *co-pyrolysis* tidak merusak stabilitas bawaan biomassa awal (J. Zhang dkk., 2020). Pada saat bersamaan, laju konduktivitas produk hibrida ini menembus 974 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mengalahkan perlakuan *post-mixing* secara mutlak (Sig. 0,000). Sinergi karakteristik ini memvalidasi keunggulan *co-pyrolysis* dalam menciptakan *biochar* komposit bernutrisi seimbang yang krusial untuk aplikasi remediasi lingkungan berkelanjutan (Biney & Gusiatin, 2024; Li dkk., 2025).

4.3 Seleksi *Biochar* Melalui Pendekatan Skoring Multikriteria .

Hasil uji multivariat membuktikan bahwa suhu *pyrolysis*, jenis bahan baku, dan metode pencampuran memengaruhi karakteristik *biochar* secara nyata ($p < 0,05$). Karena kualitas material pembenah tanah ditentukan oleh kombinasi parameter fisikokimia, evaluasi kelayakan tidak relevan apabila hanya bergantung pada parameter tunggal. Oleh sebab itu, pendekatan analisis multikriteria berbobot (*weighted multi-criteria assessment*) diaplikasikan untuk menyeleksi material yang paling berpotensi dalam memitigasi toksisitas timbal (Pb). Pendekatan ini menjamin objektivitas seleksi melalui pembobotan parameter berdasarkan kontribusi fungsionalnya terhadap kinerja *biochar* (Farkas dkk., 2021; Ige dkk., 2025).

Evaluasi kualitas terhadap delapan varian *biochar*, yang mewakili empat formulasi bahan pada tingkat pemanasan 350 °C dan 500 °C, dilakukan menggunakan enam parameter penentu. Karakteristik tersebut meliputi persentase *fixed carbon* (FC), derajat keasaman (pH), *volatile matter* (VM), kadar abu, *Electrical Conductivity* (EC), dan kadar air. Dalam analisis multikriteria ini, setiap parameter diklasifikasikan ke dalam atribut manfaat (*benefit*) atau biaya (*cost*). Pembobotan selanjutnya didistribusikan secara proporsional berdasarkan kontribusi masing-masing sifat fisikokimia terhadap stabilitas jangka panjang material arang serta kapasitas retensi kimiawi logam berat Timbal (Pb) di lingkungan tanah (Farkas dkk., 2021).

Tabel 4. 8 Klasifikasi Bobot Multi-Kriteria Seleksi *Biochar*

Parameter Uji	Sifat Kriteria	Bobot (%)	Dasar Pembobotan	Sumber
<i>Fixed carbon</i> (FC)	<i>Benefit</i>	30	Indikator stabilitas karbon dan kapasitas adsorpsi	(Hadey dkk., 2022; Paz-Ferreiro dkk., 2018)
pH	<i>Benefit</i>	25	Mendukung presipitasi dan penurunan mobilitas Pb	(Cao dkk., 2024; S. Wei dkk., 2019)
<i>Volatile matter</i> (VM)	<i>Cost</i>	15	Mencerminkan tingkat karbonisasi <i>biochar</i>	(Hassan dkk., 2020; Tarelho dkk., 2019)
Kadar Abu	<i>Benefit</i>	10	Sumber mineral anorganik basa dan ko-presipitan.	(Pellera dkk., 2021)
EC	<i>Benefit</i>	10	Indikator ketersediaan ion mineral terlarut	(Wigan, 2023; J. Zhang dkk., 2020)
Kadar Air	<i>Cost</i>	10	Menunjukkan stabilitas penyimpanan <i>biochar</i>	(Mulyati dkk., 2025)
Total Bobot		100		

Perbedaan satuan ukur antar parameter diseragamkan melalui proses normalisasi menggunakan metode Min-Max. Pada kriteria *benefit*, nilai aktual tertinggi dikalibrasi menjadi skor maksimal, sedangkan pada kriteria *cost*, nilai aktual terendah memperoleh skor tertinggi. Rentang nilai batas bawah dan batas atas yang menjadi dasar kalibrasi matematis pada tahapan normalisasi ditampilkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Nilai Maksimum dan Minimum Parameter Seleksi

Parameter	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
Kadar Air (%)	1,40	3,15
Kadar Abu (%)	28,20	63,65
<i>Volatile Matter</i> / VM (%)	18,90	39,40
<i>Fixed carbon</i> / FC (%)	6,45	40,40
pH	7,90	8,94
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	270	972

Hasil normalisasi kemudian dikalikan dengan bobot masing-masing parameter untuk merumuskan akumulasi nilai akhir. Ringkasan skor total berbobot beserta status kelayakan setiap varian *biochar* ditampilkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Matriks Evaluasi dan Pemilihan Kandidat Remediasi

Sampel	Suhu (°C)	Nilai Skor Total	Peringkat	Status Evaluasi Seleksi
Sludge + Bagasse (Pre-mixing)	500	4,31	1	Lanjut ke Tahap Inkubasi Tanah
Sludge + Bagasse (Pre-mixing)	350	3,55	2	Dieliminasi
Bagasse	500	3,22	3	Lanjut ke Tahap Inkubasi Tanah
Sludge	500	3,19	4	Lanjut ke Tahap Inkubasi Tanah
Sludge + Bagasse (Post-mixing)	500	2,88	5	Lanjut ke Tahap Inkubasi Tanah
Sludge + Bagasse (Post-mixing)	350	2,86	6	Dieliminasi

Sampel	Suhu (°C)	Nilai Skor Total	Peringkat	Status Evaluasi Seleksi
Bagasse	350	2,55	7	Dieliminasi
Sludge	350	1,95	8	Dieliminasi

Akumulasi skor akhir secara konsisten memosisikan seluruh varian *biochar* 500 °C di atas kelompok perlakuan 350 °C. Tren kelayakan ini didukung oleh uji statistik yang merekam pengaruh nyata suhu terhadap penyusutan *volatile matter*, serta peningkatan kadar abu dan pH (Adebayo & Loko, 2024; Ergin & Koşkan, 2024). Intensitas pemanasan yang lebih tinggi memicu devolatilisasi tuntas dan pemusatan mineral anorganik basa, sekaligus mempercepat pembentukan struktur karbon aromatik yang lebih terkondensasi dan stabil (X. Chen dkk., 2022).

Di antara seluruh kandidat, *biochar* hasil *co- pyrolysis pre-mixing* 500 °C mencetak akumulasi nilai terbesar (4,31). Keunggulan ini ditopang oleh kombinasi retensi *fixed carbon* yang tinggi, proporsi *volatile matter* terendah, serta lonjakan nilai EC yang melampaui perlakuan lainnya. Profil fisikokimia tersebut membuktikan adanya interaksi termokimia yang seimbang; material mampu menyediakan kerangka karbon stabil untuk adsorpsi fisik, sekaligus menyuplai ion mineral terlarut yang krusial bagi mekanisme presipitasi (Li dkk., 2025).

Berdasarkan hasil evaluasi kriteria, seluruh *biochar* bersuhu 350 °C dieliminasi dari tahapan pengujian lanjutan. Suhu 350 °C menyisakan fraksi *volatile matter* yang rentan terdekomposisi dalam jumlah besar, sehingga kerangka karbonnya mudah mengalami degradasi mikrobiologis di dalam matriks tanah. Suhu tersebut juga belum memadai untuk mendegradasi material organik secara tuntas, sehingga proses pemusatan mineral anorganik menjadi terhambat. Kondisi ini berimplikasi pada rendahnya kapasitas alkalinitas (pH) dan minimnya agen kopresipitasi (kadar abu) yang krusial untuk mengikat kation timbal (Hassan dkk., 2020; S. Wei dkk., 2019). Profil fisikokimia yang belum stabil tersebut menjadikan varian 350 °C tidak relevan untuk aplikasi remediasi jangka panjang.

Sebaliknya, empat varian *biochar* bersuhu 500 °C (*sludge*, *bagasse*, *post-mixing*, dan *pre-mixing*) ditetapkan sebagai kandidat terpilih untuk tahapan uji inkubasi tanah. Keempat material ini mewakili keunggulan fungsional spesifik, sehingga relevan digunakan untuk membandingkan kontribusi mekanisme adsorpsi fisik, presipitasi kimiawi, maupun efek sinergis pencampuran. Tahap lanjutan ini secara khusus difokuskan untuk mengevaluasi kapasitas *biochar* dalam meremediasi fisik tanah terutama porositas dan *bulk density* sekaligus menekan tingkat ketersediaan hayati (*bioavailabilitas*) Pb di dalam matriks tanah (Guo dkk., 2020).

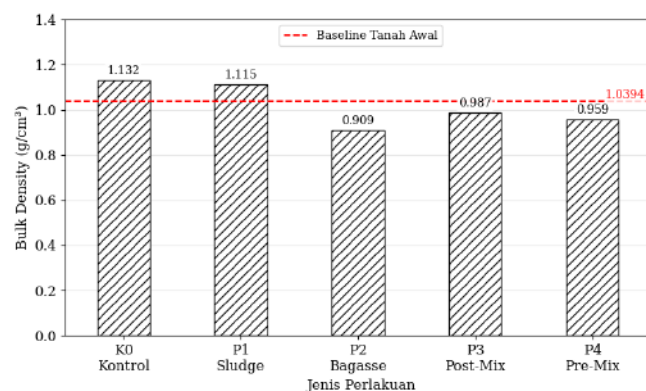
4.4 Pengaruh *Biochar* terhadap Sifat Fisik Tanah Tercemar

Penambahan *biochar* pada tanah tercemar Pb memicu perubahan metrik fisik dan kimia matriks tanah setelah masa inkubasi 28 hari. Perubahan tersebut meliputi *bulk density*, *particle density*, porositas total, pH, dan *electrical conductivity* (EC). Variasi sifat intrinsik bahan baku *biochar* menghasilkan respons yang bervariasi pada karakteristik tanah. Evaluasi parameter ini krusial karena kondisi fisikokimia tanah secara langsung mengendalikan pergerakan air, distribusi hara, serta mobilitas dan retensi logam berat (Guo dkk., 2020; B. Wei dkk., 2023). Pengaruh setiap perlakuan remediasi ditinjau melalui analisis komparatif terhadap tanah kontrol (K0).

Sebagai catatan penting dalam interpretasi data, matriks tanah dasar yang digunakan dalam pengujian laboratorium ini diambil dari lahan agrikultur produktif yang secara alami memiliki struktur rekah dan kondisi kimiawi yang cenderung subur atau normal. Kondisi kontaminasi Pb dalam studi ini dimodelkan secara buatan (*artificially contaminated soil*) melalui metode *spiking*. Batasan pemodelan artifisial berskala laboratorium ini dipilih untuk menyederhanakan pengamatan mekanisme dasar kimia dan fisik, namun belum mampu merepresentasikan kompleksitas degradasi tanah asli yang telah mengalami akumulasi polutan di lapangan (*naturally contaminated soil*). Pada kondisi riil lahan tercemar, sifat alami tanah agrikultur umumnya telah mengalami kerusakan yang jauh lebih ekstrem, sehingga interaksi ion kontaminan menjadi jauh lebih kompleks.

4.4.1 Perubahan *Bulk Density* Tanah

Berat volume (*bulk density*) merupakan parameter yang merepresentasikan derajat kepadatan fasa padat tanah. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tingkat kepadatan tanah kontrol (K0) tanpa perlakuan tercatat sebesar 1,132 g/cm³. Nilai tersebut merepresentasikan kondisi yang masih berada dalam rentang standar *topsoil* mineral normal, yakni 1,0–1,3 g/cm³ (Rusdi dkk., 2019). Namun, aplikasi remediasi *biochar* secara konsisten memicu penurunan berat volume tanah secara signifikan hingga mencapai angka di bawah 1,0 g/cm³ pada beberapa varian perlakuan. Profil komparasi nilai *bulk density* tanah pasca-inkubasi secara visual direpresentasikan pada Gambar 4.8.



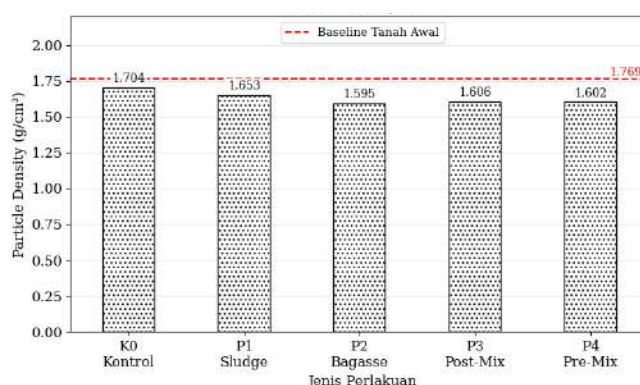
Gambar 4. 8 Grafik Bulk Density Tanah Setelah Perlakuan

Penurunan kerapatan matriks tanah tersebut secara langsung dipengaruhi oleh karakteristik bawaan partikel *biochar* yang memiliki bobot jenis jauh lebih rendah dibandingkan dengan mineral penyusun tanah (Verheijen dkk., 2019). Integrasi matriks *biochar* yang sangat berpori ke dalam sistem tanah berfungsi memperluas ruang kosong antar-agregat. Kehadiran material ringan ini mengekspansi volume total ruang tanah tanpa disertai dengan penambahan massa padatan yang setara (Moradi-choghamarani dkk., 2024). Secara mekanis, efek pengenceran berat jenis (*weight dilution effect*) ini merenggangkan susunan arsitektur tanah, sehingga menghasilkan struktur medium yang jauh lebih longgar dan gembur dibandingkan dengan kontrol (Rusdi dkk., 2019; Widyantika & Prijono, 2019).

Penurunan kepadatan tanah berpotensi memperbaiki kondisi fisik tanah melalui peningkatan ruang pori dan kemudahan pergerakan air di dalam matriks tanah. Kondisi tanah yang lebih longgar memastikan distribusi cairan di dalam medium berjalan merata. Kelancaran sirkulasi ini memperbesar peluang kontak antara kation Pb terlarut dengan situs pengikat pada permukaan *biochar* (Moradi-choghamarani dkk., 2024).

4.4.2 Perubahan *Particle Density* Tanah

Kerapatan partikel (*particle density*) adalah ukuran yang menunjukkan seberapa berat bagian padat dari tanah, tanpa menghitung rongga udara di dalamnya. Sebagai acuan, tanah mineral normal umumnya memiliki standar kerapatan partikel di kisaran 2,60 hingga 2,70 g/cm³ (Brady & Weil, 2017). Pada pengujian ini, tanah kontrol tanpa perlakuan (K0) mencatatkan nilai sebesar 1,704 g/cm³. Menariknya, penambahan *biochar* terbukti membuat kerapatan partikel tanah menjadi semakin turun (semakin ringan). Nilai paling ringan ditemukan pada tanah yang diberi *biochar bagasse* tunggal (P2) sebesar 1,595 g/cm³. Sementara itu, campuran *pre-mix* (P4) dan *post-mix* (P3) menghasilkan tingkat kepadatan yang berada di tengah-tengah, yakni masing-masing 1,602 g/cm³ dan 1,606 g/cm³.



Gambar 4. 9 Grafik Particle Density Tanah Setelah Perlakuan

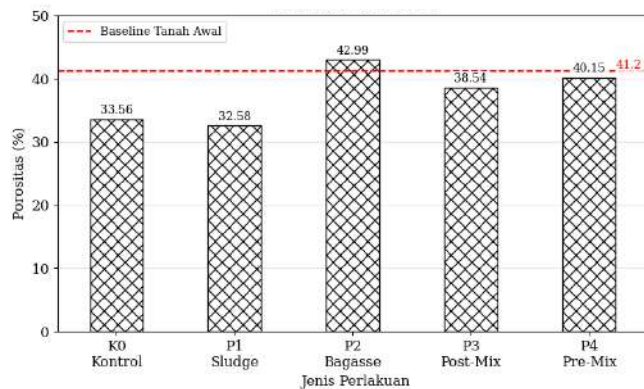
Penurunan *particle density* terjadi karena partikel *biochar* memiliki densitas intrinsik yang lebih rendah dibandingkan fraksi mineral tanah. Selama proses *pyrolysis*, sebagian besar komponen volatil biomassa terdekomposisi

sehingga menghasilkan material karbon yang ringan dan berpori. Ketika *biochar* dicampurkan ke dalam tanah, partikel karbon tersebut menggantikan sebagian fraksi mineral yang memiliki densitas lebih tinggi. Akibatnya, massa padatan tanah tidak meningkat secara proporsional terhadap volumenya sehingga nilai *particle density* menurun (Verheijen dkk., 2019). Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan karakteristik fisik tanah tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah *biochar* yang ditambahkan, tetapi juga oleh sifat dasar *biochar* yang dihasilkan dari masing-masing bahan baku.

Perlakuan *biochar bagasse* (P2) menghasilkan *particle density* terendah karena didominasi matriks karbon lignoselulosa dengan kandungan abu yang relatif rendah. Selama *pyrolysis*, dekomposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin membentuk struktur karbon berpori berdensitas rendah, sedangkan keberadaan mineral anorganik pada *biochar* berbasis *sludge* menyebabkan nilai *particle density* relatif lebih tinggi (Jeong dkk., 2016; Widyantika & Priyono, 2019). Penurunan *particle density* meningkatkan volume ruang pori sehingga memperbesar kontak antara larutan tanah dan permukaan *biochar*, yang mendukung adsorpsi, pertukaran ion, serta kompleksasi Pb^{2+} dengan gugus fungsi permukaan (Guo dkk., 2020).

4.4.3 Perubahan Porositas Total pada Tanah

Porositas total merupakan parameter yang menunjukkan persentase ruang kosong di dalam matriks tanah, yang berfungsi sebagai jalur utama bagi sirkulasi air dan udara. Berdasarkan hasil karakterisasi fisik di awal penelitian, tanah asli sebelum perlakuan (*baseline*) memiliki nilai porositas yang cukup baik, yaitu sebesar 42,05%. Namun, setelah proses pencemaran buatan dan masa inkubasi tanpa pemberian bahan pembenah, nilai porositas pada tanah kontrol (K0) mengalami penurunan menjadi hanya 33,56%. Penurunan yang drastis ini mengindikasikan terjadinya kerusakan struktur atau pemadatan (*compaction*) pada matriks tanah akibat dampak kontaminasi logam berat..



Gambar 4. 10 Grafik Porositas Tanah Setelah Perlakuan

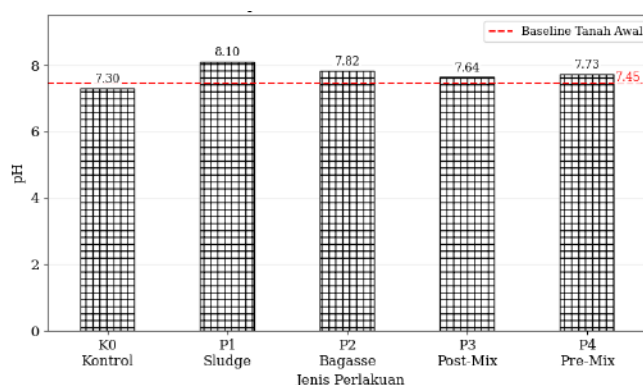
Perbaikan struktur fisik tanah melalui penambahan *biochar* bertujuan meningkatkan jumlah ruang pori dalam matriks tanah (B. Wei dkk., 2023). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *biochar bagasse* (P2) dan *biochar* komposit *pre-mix* (P4) menghasilkan porositas tertinggi, masing-masing sebesar 42,99% dan 40,15%, lebih tinggi dibandingkan kontrol sebesar 33,56%. Kondisi ini menunjukkan bahwa *biochar* mampu mengurangi pemadatan tanah melalui pembentukan ruang antarpartikel yang lebih besar. Struktur berpori tersebut juga mendukung sirkulasi udara dan air sehingga kondisi fisik tanah menjadi lebih baik (Rusdi dkk., 2019).

Peningkatan volume pori tanah ini memberikan dukungan fisik yang sangat penting bagi proses penguncian logam berat. Struktur tanah yang lebih terbuka dan gembur membuat aliran larutan tanah di sela-sela partikel menjadi lebih lancar dan merata. Celah tersebut secara mekanis mengurangi aliran kation timbal, membatasi rute migrasinya, dan mencegah penyebaran polutan ke luar batas zona pengolahan (Mulyati dkk., 2025; B. Wei dkk., 2023).

4.4.4 Perubahan pH Pada Tanah

Nilai pH tanah setelah inkubasi berada pada kisaran 7,30–8,10. Tanah kontrol (K0) memiliki pH sebesar 7,30, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan *biochar* sludge (P1) sebesar 8,10. Perlakuan P2, P3, dan P4 masing-masing menghasilkan pH sebesar 7,82; 7,64; dan 7,73. Hasil tersebut

menunjukkan bahwa aplikasi *biochar* cenderung meningkatkan pH tanah dibandingkan kontrol.

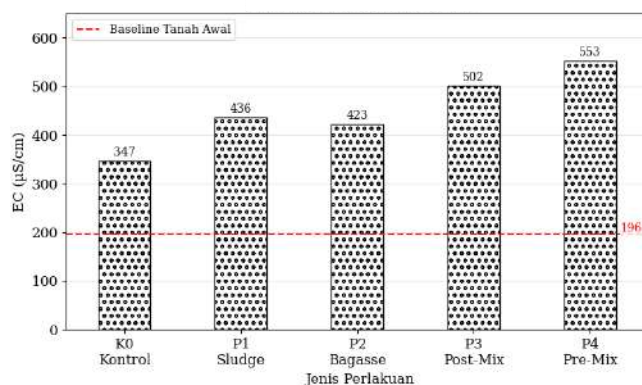


Gambar 4. 11 Grafik pH Tanah Setelah Perlakuan

Peningkatan pH lebih menonjol pada perlakuan dengan *biochar* sludge karena kandungan abu dan mineral basa yang lebih tinggi. Selama *pyrolysis*, unsur alkali dan alkali tanah terakumulasi dalam fase padat, sehingga aplikasi *biochar* pada tanah memicu kenaikan alkalinitas (Cao dkk., 2024; Pelleri dkk., 2021). Kenaikan pH mendukung remediasi Pb dengan menurunkan kelarutan logam berat di larutan tanah. Perubahan pH ini memfasilitasi mekanisme remediasi melalui presipitasi dan adsorpsi pada permukaan *biochar*.

4.4.5 Perubahan EC Pada Tanah

Nilai electrical conductivity (EC) tanah pasca inkubasi meningkat pada seluruh perlakuan. Tanah awal memiliki EC 196 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sedangkan perlakuan kontrol (K0) naik menjadi 347 $\mu\text{S}/\text{cm}$ akibat pencemaran buatan (spiking) larutan timbal nitrat $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ yang melepaskan ion Pb^{2+} dan NO_3^- ke dalam matriks tanah (Zheng dkk., 2017). Aplikasi *biochar* semakin mendongkrak nilai EC berturut-turut menjadi 423 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada P2 (bagasse), 436 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada P1 (sludge), 502 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada P3 (post-mix), dan tertinggi 553 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada P4 (pre-mix). Dinamika ini membuktikan bahwa larutan pencemar maupun remediasi *biochar* berkontribusi terhadap akumulasi elektrolit dalam larutan pori tanah (Pelleri dkk., 2021).



Gambar 4. 12 Grafik EC Tanah Setelah Perlakuan

Peningkatan *Electrical Conductivity* (EC) pada seluruh perlakuan diamati sebagai akibat dari terlarutnya mineral dari fraksi abu *biochar*. Dekomposisi termal selama proses *pyrolysis* memusatkan garam larut dan kation basa (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) yang dengan cepat terdisosiasi saat bersentuhan dengan kelembapan matriks tanah (Hassan dkk., 2020; J. Zhang dkk., 2020). Tingkat pelarutan ini sangat bergantung pada karakteristik bahan baku awal. Karena *sludge* membawa muatan mineral anorganik yang jauh lebih melimpah dibandingkan serat lignoselulosa ampas tebu, penambahan *biochar* komposit (P3 dan P4) secara konsisten menghasilkan nilai EC yang lebih tinggi dibandingkan varian *biochar* tunggal (P1 dan P2) (Cao dkk., 2024; Zafeer dkk., 2024).

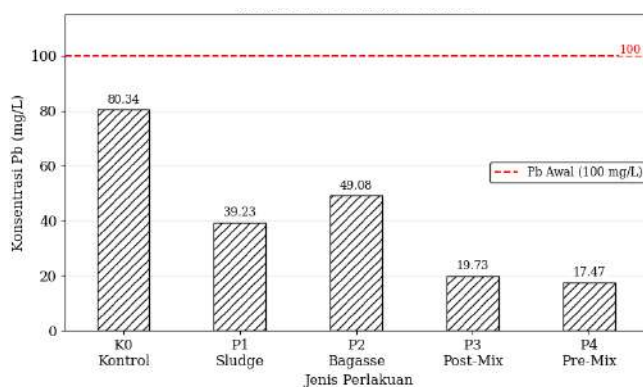
Hasil analisis menunjukkan bahwa *biochar* komposit *pre-mix* (P4) mencatatkan EC tertinggi sebesar 553 $\mu\text{S/cm}$, melebihi *biochar* komposit *post-mix* (P3) pada angka 502 $\mu\text{S/cm}$. Perbedaan ini menunjukkan bahwa homogenisasi bahan baku sebelum fase *co-pyrolysis* memicu proses termokimia yang lebih baik antara matriks organik *bagasse* dan mineral bawaan *sludge*. Interaksi tersebut secara fungsional meningkatkan kemampuan pelarutan mineral setelah ditambahkan ke dalam tanah. Temuan ini menegaskan bahwa metode *co-pyrolysis* mengoptimalkan ketersediaan mineral yang menjadi faktor pendorong kenaikan EC (Mohamed dkk., 2023).

Nilai EC pada seluruh area percobaan dipastikan tetap berada di bawah ambang batas salinitas tanah, yakni 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ atau setara 1 dS/m (Pellera dkk., 2021; Szostek dkk., 2024). Angka ini memastikan bahwa kondisi lingkungan tanah masih tergolong non-salin dan terbebas dari risiko tekanan osmotik yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, lonjakan EC pada penelitian ini secara murni mencerminkan pulihnya kapasitas penyediaan hara tanah, alih-alih sebagai penumpukan garam beracun yang merugikan (Pellera dkk., 2021).

4.5 Efektifitas Remediasi Logam Berat Timbal (Pb)

4.5.1 Penurunan Mobilitas dan Konsentrasi Pb

Efektivitas remediasi tanah tercemar dievaluasi melalui pengukuran konsentrasi timbal (Pb) tersedia setelah masa inkubasi selama 28 hari. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh perlakuan yang diberi *biochar* menghasilkan konsentrasi Pb tersedia yang lebih rendah dibandingkan konsentrasi awal pencemaran sebesar 100 mg/L maupun tanah kontrol (K0). Setelah inkubasi, tanah kontrol masih memiliki konsentrasi Pb tersedia sebesar 80,34 mg/L. Sementara itu, konsentrasi Pb menurun menjadi 39,23 mg/L pada perlakuan P1, 49,08 mg/L pada perlakuan P2, 19,73 mg/L pada perlakuan P3, dan mencapai nilai terendah sebesar 17,47 mg/L pada perlakuan P4.



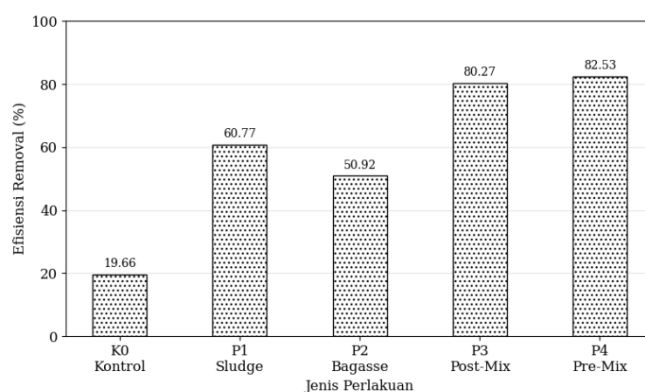
Gambar 4. 13 Grafik Ketersediaan Pb di Tanah Setelah Perlakuan

Berdasarkan Gambar 4.13, perlakuan *biochar* komposit menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menurunkan konsentrasi Pb tersedia

dibandingkan *biochar* tunggal. Perlakuan *biochar post-mix* dan *biochar pre-mix* menghasilkan konsentrasi Pb tersisa yang jauh lebih rendah dibandingkan *biochar sludge* dan *biochar bagasse*. Hasil ini mengindikasikan bahwa penggabungan *sludge* dan *sugarcane bagasse* menghasilkan karakteristik *biochar* yang lebih mendukung proses remediasi logam berat dibandingkan penggunaan *biochar* berbahan tunggal (Cao dkk., 2024; Mohamed dkk., 2023).

Analisis Timbal (Pb) pada penelitian ini difokuskan pada fraksi Pb tersedia (*available Pb*) yang diekstraksi menggunakan larutan kalsium klorida (CaCl_2) 0,01 M (Houba dkk., 2000). Parameter ini berbeda dengan Pb total yang digunakan sebagai dasar penetapan baku mutu tanah dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Oleh karena itu, pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *biochar* dalam menurunkan ketersediaan hayati (*bioavailability*) Pb, bukan untuk menilai kesesuaian baku mutu tanah secara langsung. Fraksi Pb tersedia dipilih karena merepresentasikan bentuk logam yang paling mudah bergerak di dalam larutan tanah serta paling berpotensi diserap oleh tanaman dan organisme tanah.

Efektivitas penurunan konsentrasi Pb tersebut selanjutnya tercermin pada nilai efisiensi penyisihan (*removal efficiency*) yang dihitung berdasarkan perbandingan antara konsentrasi awal pencemaran dan konsentrasi Pb tersedia setelah inkubasi.



Gambar 4. 14 Grafik Efisiensi Removal Pb Oleh *Biochar*

Grafik efisiensi removal menunjukkan pola yang konsisten dengan penurunan konsentrasi Pb tersedia. Tanah kontrol hanya menunjukkan efisiensi penyisihan sebesar 19,66%, sedangkan seluruh perlakuan *biochar* menghasilkan nilai yang lebih tinggi. Perlakuan *biochar bagasse* memberikan efisiensi removal sebesar 50,92%, diikuti oleh *biochar sludge* sebesar 60,77%, *biochar post-mix* sebesar 80,27%, dan *biochar pre-mix* sebesar 82,53%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa *biochar* komposit memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengurangi fraksi Pb tersedia dibandingkan *biochar* tunggal.

Penurunan ketersediaan Pb pada tanah dapat dikaitkan dengan perubahan sifat kimia tanah setelah aplikasi *biochar*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh perlakuan *biochar* meningkatkan nilai pH dibandingkan kontrol. Peningkatan pH menuju kondisi yang lebih alkalis dapat menurunkan kelarutan beberapa bentuk Pb di dalam tanah sehingga konsentrasi logam yang berada dalam larutan tanah menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut mendukung pembentukan senyawa Pb yang lebih stabil dan sukar larut sehingga mobilitas logam di dalam tanah dapat berkurang (Guo dkk., 2020; Y. Wei dkk., 2025).

Selain perubahan pH, peningkatan porositas tanah setelah aplikasi *biochar* juga berpotensi mendukung proses imobilisasi logam. Perlakuan yang mengandung *biochar* berbahan *bagasse* menunjukkan porositas yang lebih tinggi dibandingkan kontrol. Struktur berpori yang terbentuk selama proses *pyrolysis* menyediakan luas permukaan yang lebih besar sehingga peluang interaksi antara ion Pb dan permukaan *biochar* meningkat (Chaudhary dkk., 2024; Zafeer dkk., 2024).

Mekanisme lain yang turut berkontribusi adalah pertukaran ion pada permukaan *biochar*. Peningkatan nilai *electrical conductivity* (EC) pada tanah yang diberi *biochar* menunjukkan adanya penambahan ion terlarut yang berasal dari komponen mineral *biochar*. Keberadaan ion-ion tersebut mengindikasikan berlangsungnya proses pertukaran kation pada permukaan *biochar*, di mana ion logam seperti Pb^{2+} dapat digantikan oleh kation lain yang lebih mudah dilepaskan dari matriks *biochar* (Wigan, 2023; J. Zhang dkk., 2020).

Secara keseluruhan, perlakuan P4 menghasilkan konsentrasi Pb tersedia terendah sekaligus efisiensi removal tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *biochar* hasil *co-pyrolysis* melalui metode *pre-mixing* memiliki karakteristik yang lebih mendukung proses imobilisasi Pb di dalam tanah. Kombinasi komponen lignoselulosa dari *bagasse* dan mineral anorganik dari *sewage sludge* menghasilkan keseimbangan sifat adsorptif dan alkalinitas yang mendukung penurunan ketersediaan hayati Pb. Temuan ini menunjukkan bahwa *biochar* komposit hasil *co-pyrolysis* berpotensi digunakan sebagai remediasi tanah untuk menurunkan mobilitas dan ketersediaan Pb pada tanah tercemar (Kumar & Bhattacharya, 2021).

4.5.2 Mekanisme Imobilisasi Berdasarkan Karakteristik *Biochar*

4.5.2.1 Analisis Gugus Fungsi Permukaan (FTIR)

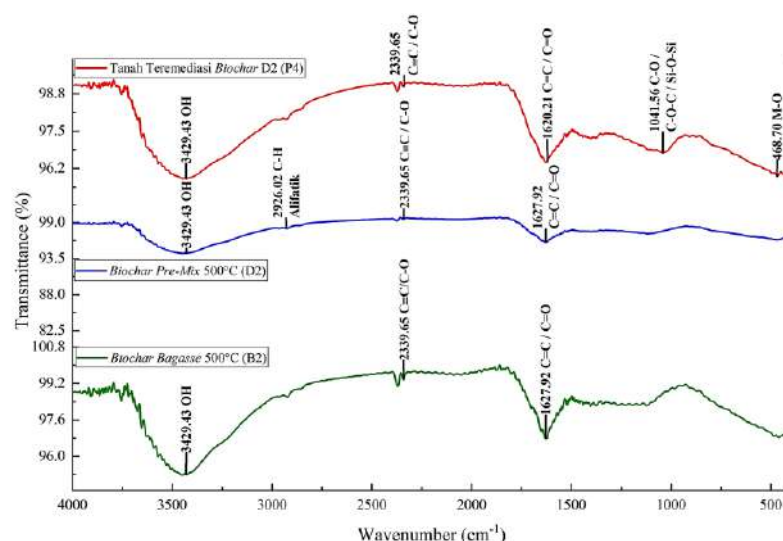
Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi permukaan pada *biochar* serta perubahan struktur kimia setelah diaplikasikan pada tanah tercemar Pb. Gugus fungsi permukaan menentukan kemampuan *biochar* dalam berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme adsorpsi, kompleksasi, maupun pertukaran ion. Rentang bilangan gelombang dan interpretasi gugus fungsi yang umum ditemukan pada *biochar* disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Rentang Bilangan Gelombang dan Gugus Fungsi FTIR pada *Biochar*

Gugus Fungsi	Rentang Bacaan (cm ⁻¹)	Sumber Rujukan Jurnal
–OH (<i>stretching</i>)	3200 – 3600	Pellera dkk. (2021); Khalid dkk. (2024); Hadey dkk. (2022)
C–H alifatik (<i>stretching</i>)	2800 – 2980	Wei dkk. (2019); Veiga dkk. (2021)
C≡C / Ikatan Keton	2300 – 2400	Hadey dkk. (2022)
C=O (<i>stretching</i>)	1650 – 1750	Hadey dkk. (2022); Chaudhary dkk. (2024)

C=C Aromatik	1550 – 1620	Veiga dkk. (2021); Hassan dkk. (2020)
C–O / C–O–C (<i>stretching</i>)	1000 – 1300	Moradi- Choghamarani dkk. (2024); Veiga dkk. (2021)
Si–O–Si / Si–O	1040 – 1100	Pellera dkk. (2021); Moradi- Choghamarani dkk. (2024)
Logam–Oksigen (M–O)	400 – 600	Hassan dkk. (2020); Cao dkk. (2024)

Berdasarkan rentang bilangan gelombang tersebut, spektrum FTIR *biochar bagasse* (B2), *biochar* komposit hasil *pre-mixing* (D2), dan tanah tercemar yang telah diremediasi *biochar* D2 setelah inkubasi 28 hari (P4) ditampilkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Spektrum FTIR *Biochar* Tanah Teramendemen *Biochar*

Hasil pembacaan spektrum menunjukkan bahwa spesimen *biochar bagasse* (B2) dan *biochar* komposit *pre-mix* (D2) secara konsisten memiliki pita serapan lebar pada bilangan gelombang $3429,43\text{ cm}^{-1}$. Area ini merepresentasikan vibrasi regangan gugus hidroksil (–OH) yang bersumber dari senyawa fenolik, alkohol, maupun molekul air yang tersisa pada

material (Zafeer dkk., 2024). Selain itu, spesimen *biochar bagasse* (B2) dan *biochar* komposit *pre-mix* (D2) sama-sama menunjukkan serapan dominan pada rentang 1570–1655 cm^{-1} , yang merupakan penanda keberadaan kerangka cincin aromatik (C=C) dan gugus karbonil (C=O) (Hassan dkk., 2020; Veiga dkk., 2021).

Perbedaan karakteristik antara kedua material awal tersebut terlihat pada spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2), di mana terdeteksi kemunculan pita serapan tambahan pada 2926,02 cm^{-1} . Pita ini mengindikasikan vibrasi ikatan C–H alifatik, yang merupakan residu fraksi organik bawaan dari komponen *sludge* yang tidak terdekomposisi sepenuhnya selama proses *pyrolysis*, sehingga memberikan keragaman struktur pada permukaan *biochar* komposit *pre-mix* (D2) (S. Wei dkk., 2019)

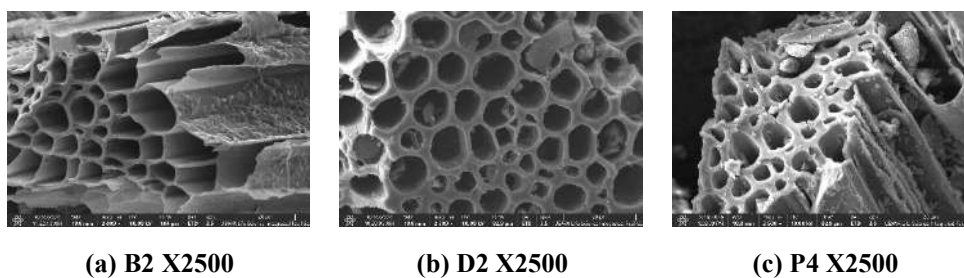
Perubahan struktur ikatan kimia terlihat jelas pada spesimen tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* (P4). Setelah melalui masa inkubasi 28 hari di dalam tanah tercemar, spektrum tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* (P4) memunculkan pita serapan baru secara dominan pada 1041,56 cm^{-1} . Area ini diasosiasikan dengan vibrasi gugus silikat (Si–O–Si) bawaan dari mineral tanah yang beririsan dengan gugus oksigenat (C–O atau C–O–C) (Moradi-Choghamarani dkk., 2024). Lebih lanjut, pada area *fingerprint* terdeteksi pita tajam pada 422,41 cm^{-1} yang secara spesifik diidentifikasi sebagai vibrasi ikatan logam–oksigen (M–O) (Cao dkk., 2024).

Kehadiran pita M–O pada spesimen tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* (P4) mengonfirmasi terjadinya interaksi kimiawi antara *biochar* komposit *pre-mix* (D2), mineral penyusun tanah, dan kation logam selama masa inkubasi. Terdeteksinya ikatan logam–oksigen ini menjadi indikasi analitik bahwa kation logam berat di dalam tanah, termasuk probabilitas interaksi presipitasi kation Pb^{2+} , telah terikat pada situs aktif oksigenat maupun fasa mineral sekunder (Hassan dkk., 2020). Secara

keseluruhan, perbandingan ketiga spesimen ini menunjukkan perbedaan keragaman struktural antara *biochar bagasse* (B2) dan *biochar* komposit *pre-mix* (D2) sebagai material mentah, sementara spektrum tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* (P4) memvisualisasikan terjadinya pembentukan ikatan kompleks mineral baru di lingkungan tanah.

4.5.2.2 Analisis Morfologi dan Komposisi Unsur (SEM-EDX)

Analisis *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX) dilakukan untuk mengamati morfologi permukaan *biochar* serta mengidentifikasi komposisi unsur penyusunnya. Karakteristik fisik dan kimia permukaan *biochar* berperan penting dalam menentukan kemampuan material untuk mengadsorpsi dan mengimobilisasi logam berat. Citra SEM digunakan untuk mengevaluasi perkembangan struktur pori, sedangkan analisis EDX digunakan untuk mengidentifikasi distribusi unsur pada permukaan sampel.



Gambar 4. 16 (a) *Biochar* B2 Perbesaran 2500x, (b) *Biochar* D2 Perbesaran 2500x, (c) Tanah Terremediasi P4 Perbesaran 2500x

Berdasarkan visualisasi pada Gambar 4.16, spesimen *biochar bagasse* (B2) menampilkan struktur permukaan yang didominasi oleh rongga memanjang dengan distribusi ukuran pori yang asimetris. Morfologi ini merupakan karakteristik khas dari proses karbonisasi biomassa lignoselulosa, yang terbentuk akibat dekomposisi serta pelepasan komponen hemiselulosa, selulosa, dan lignin selama fase *pyrolysis*. Secara teoretis, ruang pori internal ini berpotensi menyediakan rute pergerakan cairan sekaligus area kontak fisik dasar untuk adsorpsi kontaminan (Zafeer dkk., 2024).

Pada spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2), arsitektur permukaannya tampak mengalami modifikasi dengan terbentuknya jaringan rongga yang lebih terbuka dan saling terkoneksi jika dibandingkan dengan *biochar bagasse* (B2). Selain itu, tekstur permukaan *biochar* komposit *pre-mix* (D2) terlihat lebih kasar dengan sebaran agregat partikel mineral yang menempel pada matriks karbon. Perubahan topologi ini mengindikasikan bahwa integrasi lumpur limbah (*sludge*) melalui metode *pre-mixing* berkontribusi dalam mendiversifikasi struktur permukaan. Variasi bentuk fisik ini mengindikasikan adanya peningkatan luas permukaan efektif yang dapat memfasilitasi penyediaan situs aktif bagi retensi logam berat (J. Zhang dkk., 2020).

Modifikasi visual yang sangat tegas teramati pada spesimen tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* pascainkubasi 28 hari (P4). Pada Gambar 4.16, terlihat fenomena penutupan sebagian rongga pori *biochar* oleh agregat matriks tanah. Struktur permukaan menjadi jauh lebih padat dibandingkan *biochar* aslinya. Fenomena ini membuktikan bahwa sistem pori *biochar* di lingkungan tanah aktual tidak hanya berfungsi sebagai ruang kosong untuk menangkap cairan, melainkan juga bertindak sebagai titik perekatan bagi partikel mineral dan bahan organik selama masa inkubasi (Hadey dkk., 2022).

Sampel	Unsur	Wt. (%)	At. (%)
B2 (<i>Biochar Bagasse</i> 500 °C)	C	79.0	72.0
	O	20.3	24.6
	Mg	0.1	0.2
	P	0.0	0.0
	K	0.2	0.7
	Zr	0.4	2.5
D2 (<i>Biochar Pre-Mix</i> 500 °C)	C	82.6	76.2
	O	15.1	18.6
	Mg	0.2	0.3
	Al	0.4	0.8
	Si	0.6	1.3

Sampel	Unsur	Wt. (%)	At. (%)
P4 (Tanah Terremediasi <i>Biochar D2</i>)	P	0.6	1.4
	K	0.5	1.4
	C	68.0	58.9
	N	7.1	7.2
	O	21.9	25.2
	Na	0.2	0.3
	Mg	0.1	0.2
	Al	0.8	1.5
	Si	1.3	2.7
	P	0.0	0.0
	Zr	0.6	4.0

Hasil pemetaan EDX menunjukkan bahwa persentase unsur karbon (C) dan oksigen (O) mendominasi komposisi di seluruh sampel material. Spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2) mencatatkan komposisi karbon sebesar 82,6 wt.%, sedikit lebih tinggi dibandingkan spesimen *biochar bagasse* (B2) yang berada pada 79,0 wt.%. Retensi fraksi karbon ini menandakan dominasi struktur polimerik hasil proses *pyrolysis* yang berfungsi membentuk kerangka material secara stabil (Veiga dkk., 2021). Sementara itu, fluktuasi keberadaan unsur oksigen sejalan dengan deteksi spektroskopi FTIR sebelumnya terkait eksistensi gugus fungsi beroksigen (Zafeer dkk., 2024).

Perbedaan fundamental antara kedua material remediasi ini terlihat dari sebaran mineral abunya. Dibandingkan dengan *biochar bagasse* (B2), spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2) menunjukkan keragaman elemen sekunder yang lebih variatif dengan terdeteksinya silikon (Si), aluminium (Al), dan fosfor (P). Kehadiran unsur-unsur spesifik tersebut merupakan pasokan dari residu inorganik *sludge*. Terdistribusinya mineral pada matriks karbon secara literatur dapat meningkatkan probabilitas material dalam mengikat polutan. Fasa mineral ini menyediakan jalur interaksi tambahan, seperti pertukaran ion dan presipitasi kation di permukaan, di luar batas kapasitas adsorpsi ruang pori (Duan dkk., 2020; Pelleri dkk., 2021).

Transisi molekuler kembali terekam pada spesimen tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* (P4). Kandungan karbon bebas menyusut menjadi 68,0 wt.%, diiringi dengan melonjaknya proporsi oksigen, silikon, aluminium, serta hadirnya nitrogen. Peningkatan unsur-unsur penyusun tanah ini selaras dengan profil visual SEM, yang membuktikan bahwa partikel tanah telah berbaur membalut kerangka *biochar*. Interaksi fasa padat ini mengindikasikan bahwa *biochar* komposit *pre-mix* (P4) telah menjadi bagian integral dari kompleks agregat organo-mineral di matriks tanah (Moradi-choghamarani dkk., 2024).

Berdasarkan karakteristik morfologi dan kekayaan elemental tersebut, tergambar hubungan logis mengapa terdapat perbedaan kapasitas imobilisasi Pb antar perlakuan. Spesimen *biochar bagasse* (B2) yang hanya bertumpu pada struktur fisik pori memanjang memiliki rute pengikatan yang lebih terbatas. Di sisi lain, spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2) tidak hanya menyediakan pori yang terkoneksi, melainkan juga menaburkan situs mineral alkalis (Si, Al, P) secara merata di permukaannya. Karakteristik ganda (arsitektur pori dan kelimpahan situs mineral) inilah yang secara teoritis mampu mendongkrak efektivitas penangkapan ion Pb secara lebih masif (Cao dkk., 2024; Pelleri dkk., 2021).

Secara keseluruhan, analisis SEM-EDX mengonfirmasi bahwa penambahan *sludge* pada spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2) menghasilkan diferensiasi struktur fungsional jika dibandingkan dengan perlakuan tunggal *biochar bagasse* (B2). Pembentukan agregat baru yang terdeteksi pada spesimen tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* (P4) memperkuat asumsi bahwa proses imobilisasi Pb tidak hanya berhenti pada penjeratan di rongga pori *biochar*, tetapi diperkuat oleh serangkaian interaksi kimiawi jangka panjang antara *biochar*, matriks tanah, dan kation polutan di sekitarnya.

4.5.2.3 Estimasi Luas Area Pori Berbasis Citra (ImageJ)

Struktur ruang pori *biochar* dievaluasi menggunakan analisis citra digital melalui perangkat lunak ImageJ pada mikrograf SEM perbesaran 2.000×. Proses segmentasi citra biner dilakukan dengan metode *thresholding* untuk memisahkan area rongga terbuka dari matriks padatan karbon arang. Fitur *Analyze Particles* diaplikasikan secara otomatis untuk mengekstraksi metrik sebaran lubang pori yang terdeteksi. Parameter kuantitatif yang diperoleh meliputi jumlah pori (*count*), luas area pori total (*total area*), luas pori rata-rata (*average size*), persentase area pori atau porositas area (*%Area*), indeks kebulatan (*circularity*), kekompakan (*solidity*), dan diameter Feret (*Feret diameter*).

Tabel 4. 12 Karakteristik Struktur Pori *Biochar* Berdasarkan Analisis Citra Menggunakan ImageJ

Sampel Perlakuan	Count	Total Area (µm ²)	Average Size (µm ²)	Porositas Area (%Area)	Circularity	Solidity
B2 (<i>Biochar Bagasse</i>)	92	2.975,95	32,347	38,011	0,306	0,578
D2 (<i>Biochar Komposit Pre-mix</i>)	53	4.165,04	78,586	53,199	0,296	0,577
P4 (Tanah Teremediasi <i>Biochar Komposit Pre-mix</i>)	77	3.114,99	40,454	39,787	0,333	0,614

Karakteristik geometri pori seluruh spesimen tercermin dari rentang *circularity* (0,296–0,333) dan *solidity* (0,577–0,614). Nilai *circularity* yang rendah menunjukkan bentuk pori ireguler yang menjauhi

bentuk lingkaran, sedangkan nilai *solidity* yang rendah mengindikasikan dinding pori yang berlekuk dan tingkat konkavitas yang tinggi (Sui dkk., 2023). Ketidakteraturan bentuk fisik ini umum dijumpai pada material hasil *pyrolysis* akibat heterogenitas pelepasan senyawa volatil (Veiga dkk., 2021). Kompleksitas morfologi ini secara teoretis memperluas area antarmuka, yang berpotensi menyediakan lebih banyak situs retensi untuk interaksi adsorpsi di permukaan material (Jamilatun dkk., 2022).

Berdasarkan hasil ekstraksi citra, spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2) menampilkan struktur makro dan mesopori yang paling berkembang dibandingkan spesimen *biochar bagasse* (B2). Hal ini ditunjukkan oleh capaian luas area pori total ($4.165,04 \mu\text{m}^2$), luas pori rata-rata ($78,586 \mu\text{m}^2$), dan persentase porositas area (53,199%) yang lebih tinggi. Perkembangan arsitektur pori pada spesimen *biochar* komposit *pre-mix* (D2) ini mengindikasikan ketersediaan ruang sela mekanis yang lebih masif. Karakteristik fisik ini berperan dalam meningkatkan aksesibilitas cairan larutan, memperluas rute penetrasi ion, serta memperbesar potensi retensi yang mendasari kelangsungan mekanisme adsorpsi permukaan dan presipitasi mineral.

Modifikasi struktur pori terekam jelas pada spesimen tanah teremediasi *biochar* komposit *pre-mix* (P4) pascainkubasi. Persentase porositas area menyusut menjadi 39,787% dibandingkan *biochar bagasse* (D2) sebelum ditambahkan ke dalam matriks tanah. Penurunan ini membuktikan bahwa sebagian rongga pori *biochar* telah terisi oleh partikel tanah, bahan organik, dan formasi presipitasi sekunder selama 28 hari inkubasi. Fenomena interaksi fasa padat ini sejalan dengan literatur (Wu dkk., 2022). Meskipun tertutup sebagian, bertahannya porositas di angka 39,787% mengonfirmasi bahwa arsitektur dasar *biochar* tetap utuh dan berkontribusi nyata pada perbaikan rongga matriks tanah.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Karakteristik bahan baku menunjukkan bahwa *sludge* memiliki kadar abu (35,60%), pH (9,70), dan *electrical conductivity*/EC (196 $\mu\text{S}/\text{cm}$) yang tinggi, tetapi kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) relatif rendah. Sebaliknya, *bagasse* memiliki kandungan karbon tetap yang lebih tinggi dengan kadar abu yang lebih rendah. Kombinasi kedua bahan melalui proses *co-pyrolysis* menghasilkan *biochar* komposit yang mampu mengintegrasikan keunggulan masing-masing bahan, yaitu stabilitas karbon dari *bagasse* dan kandungan mineral dari *sludge*.
2. Jenis bahan baku dan suhu *pyrolysis* berpengaruh signifikan terhadap karakteristik *biochar* ($p < 0,05$). Peningkatan suhu *pyrolysis* dari 350°C ke 500°C secara konsisten menaikkan kadar abu, karbon tetap, pH, dan EC, serta menurunkan *volatile matter*. Sinergi termokimia terbaik dicapai oleh metode komposit *pre-mixing* suhu 500°C yang berhasil menekan *volatile matter* hingga ke angka terendah (18,89%) dan menaikkan nilai EC hingga mencapai 972 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Berdasarkan evaluasi skoring multikriteria, varian komposit *pre-mixing* suhu 500°C ditetapkan sebagai perlakuan terbaik dengan capaian skor tertinggi sebesar 4,31 dari skala 5.
3. Penambahan *biochar* terbukti mampu memperbaiki sifat fisik dan hidrologis tanah tercemar setelah masa inkubasi selama 28 hari. Perlakuan menggunakan *biochar* komposit *pre-mixing* pada suhu 500°C menjadi agen terbaik yang mampu menurunkan *bulk density* sebesar 19,68%, menurunkan *particle density* sebesar 6,40%, serta meningkatkan porositas total tanah sebesar 28,10%. Perbaikan struktural ini mengonfirmasi kapasitas *biochar* dalam meremediasi ruang pori tanah sekaligus mengurangi pemadatan internal campuran tanah.

4. Penambahan *biochar* secara efektif memperbaiki karakteristik kimia tanah tercemar melalui pelepasan komponen aktif arang. Setelah periode inkubasi selama 28 hari, penambahan *biochar* komposit *pre-mixing* pada suhu 500°C meningkatkan pH tanah sebesar 10,96% dan menaikkan nilai *electrical conductivity* (EC) tanah sebesar 59,37%. Peningkatan ini membuktikan terjadinya disosiasi mineral alkalis dari fraksi abu abu *biochar* ke dalam tanah yang memicu efek pengapuran (*liming effect*) sekaligus penguatan kapasitas penyangga kimia.
5. Karakteristik fisikokimia *biochar* berperan penting dalam efektivitas remediasi Pb. Hasil analisis gugus fungsi dan morfologi permukaan menunjukkan keberadaan gugus fungsi aktif, struktur pori yang berkembang, serta kandungan mineral alkalis yang mendukung mekanisme adsorpsi, pertukaran ion, kompleksasi, dan presipitasi Pb. *Biochar* komposit *pre-mixing* pada suhu 500 °C menghasilkan konsentrasi Pb tersedia terendah sebesar 17,47 mg/L dari konsentrasi awal 80,35 mg/L dengan efisiensi penyisihan sebesar 82,53%, sehingga menjadi perlakuan terbaik dalam penelitian ini.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji variasi rasio berat spesifik *sludge* dan *bagasse* yang lebih luas, seperti perbandingan 25:75, 40:60, dan 75:25, dalam proses *co-pyrolysis*. Hal ini untuk mengetahui perbedaan karakteristik dari *biochar* dengan rasio berat yang berbeda.
2. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan sampel tanah yang secara alami telah tercemar (*naturally contaminated soil*) agar efektivitas *biochar* komposit dapat dievaluasi pada kondisi lapangan yang lebih representatif. Sebelum remediasi dilakukan, perlu dilakukan karakterisasi awal tanah meliputi *bulk density*, *particle density*, pH, *electrical conductivity* (EC), dan kadar logam sebagai data dasar untuk mengevaluasi efektivitas remediasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adebayo, P., & Loko, A. (2024). *Determine Robust Procedure for Testing Variance Equality Using Type I Error Rate and Power..* **Malaysian Journal of Applied Sciences**, 9(2), 68–76.
- Ahadi, G. D., & Zain, N. N. L. E. (2023). *The Simulation Study of Normality Test Using Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, and Shapiro-Wilk..* **Eigen Mathematics Journal**, 6(1), 11–19.
- Al-zyoud, M., Mostafa, S. A., Khersan, I., Gowrishankar, J., Kumar, P., Singla, S., Sabirov, S., & Khudayberganov, I. (2026). *Effects of physical properties on the heavy metal adsorption of biochar via a robust approach..* **Current Research in Biotechnology**, 11, 100367.
- Assouline, S. (2021). *What Can We Learn From the Water Retention Characteristic of a Soil Regarding Its Hydrological and Agricultural Functions? Review and Analysis of Actual Knowledge..* **Water Resources Research**, 57(12), 1–16.
- Biney, M., & Gusiatin, M. Z. (2024). *Biochar from Co-Pyrolyzed Municipal Sewage Sludge (MSS): Part 1: Evaluating Types of Co-Substrates and Co-Pyrolysis Conditions..* **Materials**, 17(14), 3603.
- Biu, O. E., Nwakuya, T. M., & Nduka, W. (2020). *Detection of Non-Normality in Data Sets and Comparison between Different Normality Tests..* **Asian Journal of Probability and Statistics**, 5(4), 1–20.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The Nature and Properties of Soils..* **Journal of Range Management**, 15(6), 420.
- Cao, J., Jiang, Y., Tan, X., Li, L., Cao, S., Dou, J., Chen, R., Hu, X., Qiu, Z., Li, M., Chen, Z., & Zhu, H. (2024). *Sludge-based biochar preparation:*

pyrolysis and co-pyrolysis methods, improvements, and environmental applications.. **Fuel**, 373, 132265.

Chaudhary, H., Dinakaran, J., Notup, T., Vikram, K., & Rao, K. S. (2024). *Comparison of Adsorption Performance of Biochar Derived from Urban Biowaste Materials for Removal of Heavy Metals..* **Environmental Management**, 73(2), 408–424.

Chen, S., Xia, X., Ding, Y., Feng, X., Lin, Q., Li, T., Bian, R., Li, L., Cheng, K., Zheng, J., Zhang, X., Xia, S., Wang, Y., Liu, X., & Pan, G. (2024). *Changes in aggregate-associated carbon pools and chemical composition of topsoil organic matter following crop residue amendment in forms of straw, manure and biochar in a paddy soil..* **Geoderma**, 448, 116967.

Chen, S., Zhang, L., Shen, Z., & Sun, Y. K. (2025). *Co-pyrolysis of oily sludge and wheat straw to prepare oilfield produced water biochar adsorbent..* **Desalination and Water Treatment**, 323, 101344.

Chen, X., Wu, R., Sun, Y., & Jian, X. (2022). *Synergistic Effects on the Co-pyrolysis of Agricultural Wastes and Sewage Sludge at Various Ratios..* **ACS Omega**, 7(1), 1264–1272.

Cheng, S., Chen, T., Xu, W., Huang, J., Jiang, S., & Yan, B. (2020). *Application Research of Biochar for the Remediation of Soil Heavy Metals Contamination: A Review..* **Molecules**, 25(14), 3167.

Demir, S. (2022). *Comparison of Normality Tests in Terms of Sample Sizes under Different Skewness and Kurtosis Coefficients..* **International Journal of Assessment Tools in Education**, 9(2), 397–409.

Deng, Y. (2020). *Low-cost adsorbents for urban stormwater pollution control..* **Frontiers of Environmental Science and Engineering**, 14(5).

- Duan, X. Y., Cao, Y., Liu, T. Z., Li, L., Wang, B., & Wang, X. D. (2020). *Nutrient stability and sorption of sewage sludge biochar prepared from co-pyrolysis of sewage sludge and stalks/mineral materials.. Environmental Pollutants and Bioavailability*, 32(1), 12–18.
- Elisa, Shintawati, Afifah, D. A., & Ramandani, A. A. (2024). *Characteristics Candlenut shell-based activated carbon for reduction Iron (Fe) in surface water from Bratasena Tulang Bawang, Lampung.. Journal of Natural Sciences and Mathematics Research*, 10(1), 35–45.
- Ergin, M., & Koşkan, Ö. (2024). *Evaluating The Type I Error Rate Performances of Hsieh, F, and Kruskal-Wallis Tests Using Monte Carlo Simulation Technique.. Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi*, 6(2), 132–138.
- Farkas, É., Feigl, V., Vaszita, E., Uzinger, N., Rékási, M., Gruiz, K., & Molnár, M. (2021). *Screening and ranking methodology applied to biochars aimed at acidic and calcareous sandy soil improvement.. Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 65(3), 361–377.
- Figueredo, N. A. de, Costa, L. M. da, Melo, L. C. A., Liebeneichler, E. A., & Tronto, J. (2017). *Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants.. Revista Ciência Agronômica*, 48(3), 395–403.
- Fika, H. H., Elystia, S., & Sasmita, A. (2021). *Pengolahan Tanah Tercemar Logam Berat Pb dan Cd Menggunakan Biochar Sekam Padi dengan Variasi Ukuran Partikel.. Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 7(1), 59–68.
- Guo, M., Song, W., & Tian, J. (2020). *Biochar-Facilitated Soil Remediation: Mechanisms and Efficacy Variations.. Frontiers in Environmental Science*, 8, 521512.

- Hadey, C., Allouch, M., Alami, M., Boukhelifi, F., & Loulidi, I. (2022). *Preparation and Characterization of Biochars Obtained from Biomasses for Combustible Briquette Applications.. Scientific World Journal*, 2022.
- Hassan, M., Liu, Y., Naidu, R., Parikh, S. J., Du, J., Qi, F., & Willett, I. R. (2020). *Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis.. Science of the Total Environment*, 744, 140714.
- He, D., Luo, Y., & Zhu, B. (2024). *Feedstock and pyrolysis temperature influence biochar properties and its interactions with soil substances: Insights from a DFT calculation.. Science of the Total Environment*, 922.
- Houba, V. J. G., Temminghoff, E. J. M., Gaikhorst, G. A., & van Vark, W. (2000). *Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent.. Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31(9–10), 1299–1396.
- Ige, A. R., Łaska, G., Świdorski, G., & Zajac, G. (2025). *Optimizing agricultural biomass selection for biochar production using multicriteria decision-making.. Scientific Reports*, 15(1).
- Imran, S., Sumi, M. J., Harine, I. J., Paul, N. C., Mahamud, M. A., Rabbi, R. H. M., Brestic, M., & Rhaman, M. S. (2025). *Biochar Amendments in Soil: A Sustainable Approach for Mitigating Heavy Metal Stress in Plants.. Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 94(4), 1073– 1109.
- Jamilatun, S., Pitoyo, J., Amelia, S., Ma'arif, A., Hakika, D. C., & Mufandi, I. (2022). *Experimental Study on The Characterization of Pyrolysis Products from Bagasse (Saccharum Officinarum L.).. Indonesian Journal of Science & Technology*, 7(3), 565–582.

- Jeong, C. Y., Dodla, S. K., & Wang, J. J. (2016). *Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products..* **Chemosphere**, 142, 4–13.
- Kim, T. K., & Park, J. H. (2019). *More about the basic assumptions of t-test: Normality and sample size..* **Korean Journal of Anesthesiology**, 72(4), 331–335.
- Kumar, A., & Bhattacharya, T. (2021). *Biochar: a sustainable solution..* **Environment, Development and Sustainability**, 23(5). Springer Netherlands.
- Kumar, A., Kumar, V., & Singh, B. (2021). *Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective..* **International Journal of Biological Macromolecules**, 169, 564–582.
- Kuncara, J., Setyawan, M., & Hakika, D. C. (2024). *Characteristics of Bagasse Biochar in Industrial Scale..* **Chemosphere**, 3(1), 145–158.
- Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Malang. (2026). **Reaktor Pyrolysis**. Politeknik Negeri Malang, Malang.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation** (2nd ed.). Routledge, London and New York.
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). *An overview on engineering the surface area and porosity of biochar..* **Science of the Total Environment**, 763. Elsevier B.V.

- Li, Z., Hafeez, F., Zhang, J., Chen, K., Zeng, B., Qi, F., Yang, L., & Zhu, H. (2025). *Effect of anaerobic digested sludge biochar on soil quality improvement: An insight into mechanisms, microbial composition, and toxicity risk assessment..* **Chemosphere**, 370, 143948.
- Lian, W., Shi, W., Tian, S., Gong, X., Yu, Q., Lu, H., Liu, Z., Zheng, J., Wang, Y., Bian, R., Li, L., & Pan, G. (2025). *Preparation and application of biochar from co-pyrolysis of different feedstocks for immobilization of heavy metals in contaminated soil..* **Waste Management**, 163, 12–21.
- Liu, Y., Zhang, R., Sun, Z., Shen, Q., Li, Y., Wang, Y., Xia, S., Zhao, J., & Wang, X. (2020). *Remediation of artificially contaminated soil and groundwater with copper using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate..* **Environmental Pollution**, 115978.
- Lu, X., & Gu, X. (2022). *A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency..* **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, 15(1). BioMed Central.
- Ma, L., Xia, J., & Hu, Y. (2022). *Experimental study on co-pyrolysis of sludge and biomass straw..* **Thermal Science and Engineering**, 5(2), 35.
- Manea, E. E., & Bumbac, C. (2024). *Sludge Composting—Is This a Viable Solution for Wastewater Sludge Management?..* **Water (Switzerland)**, 16(16).
- Matin, N. H., & Aydin, E. (2022). *Reviewing the effect of pyrolysis temperature on the fourier-transform infrared spectra of biochars..* **Acta Horticulturae et Regiotecturae**, 25(2), 160–173.
- Mayilswamy, N., Nighojkar, A., Edirisinghe, M., Sundaram, S., & Kandasubramanian, B. (2023). *Sludge-derived biochar: Physicochemical characteristics for environmental remediation..* **Applied Physics Reviews**.

- Mazumder, T. S., Mahmud, R., Rahman, M. M., & Islam, M. S. (2025). *Assessment of nutrient and heavy metal contents in a sewage sludge treatment plant through hydrothermal carbonization..* **South African Journal of Chemical Engineering**, 53, 117–126.
- Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). *Descriptive statistics and normality tests for statistical data..* **Annals of Cardiac Anaesthesia**, 22(1), 67–72.
- Mohamed, B. A., Ruan, R., Bilal, M., Khan, N. A., Awasthi, M. K., Amer, M. A., Leng, L., Hamouda, M. A., Vo, D. V. N., & Li, J. (2023). *Co-pyrolysis of sewage sludge and biomass for stabilizing heavy metals and reducing biochar toxicity: A review..* **Environmental Chemistry Letters**, 21(2), 1231–1250.
- Mohammadi Galangash, M., Mahdavianpour, M., & Ghafouri Safa, S. (2018). *Characterization of an Industrial Sewage Sludge and Its Evaluation for Land Application..* **Iranian Journal of Toxicology**, 12(5), 27–34.
- Moradi-choghamarani, F., Moosavi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2024). *Sugarcane bagasse derived biochar potential to improve soil structure and water availability in texturally different soils..* **Geoderma**, 1–18.
- Mulyati, S. S., Hidayah, N., Kamaludin, A., Iqbal, M., & Aripin, S. (2025). *Effectiveness of sawdust-derived biochar in reducing lead contamination and enhancing soil quality parameters..* **Kerman University of Medical Sciences**, 12, 1368.
- Nindyapuspa, A., Dermawan, D., Pramestyawati, T. N., Firmansyah, B. W., & Pakpahan, A. B. (2025). *Analisis Kadar Air, Abu, dan Fixed Carbon pada Biobriket Sludge IPAL dengan Metode Karbonisasi 600°C..* **Jurnal Teknologi Maritim**, 8(1), 49–58.

- Nurhaswinda, Muslimah, N., Yuliani, C. E., Amanda, P. R., Mayura, V., Rahmadhansyah, A., Nurrahman, H., Qadri, R., Bramantyo, D., & Rifaldi, A. (2026). *Uji Normalitas dan Homogenitas dalam Analisis Statistik.. Didaktik: Jurnal Ilmiah PGSD STKIP Subang*, 12(01), 98– 105.
- Oksanen, J., Pöykiö, R., & Dahl, O. (2023). *Fertiliser Properties of Wastewater Sludge and Sludge Ash - A Case Study from the Finnish Forest Industry.. Ecological Chemistry and Engineering S*, 30(1), 63–78.
- Paz-Ferreiro, J., Nieto, A., Méndez, A., Askeland, M. P. J., & Gascó, G. (2018). *Biochar from biosolids pyrolysis: A review.. International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5).
- Pellera, F., Regkouzas, P., & Manolikaki, I. (2021). *Biochar Production from Waste Biomass: Characterization and Evaluation for Agronomic and Environmental Applications.. Journal of Experimental Agriculture International*, 17, 15–29.
- Pinho, J. B. de, Bianchini, A., Pereira, P. S. X., Nunes, L. C., Daros, R. F., Silva, J. G. da, & Castro, D. A. (2019). *Sugarcane Biochar for Agricultural Use Produced in Different Conditions of Pyrolysis.. Journal of Experimental Agriculture International*, 38(4), 1–8.
- Rolka, E., Wyszowski, M., & Zych, W. (2023). *Wood Biomass Ash (WBA) from the Heat Production Process as a Mineral Amendment for Improving Selected Soil Properties.. Energies*, 16(13), 5110.
- Ruan, R., Zhang, Z., Tu, R., Wang, Y., Xiong, P., Li, W., & Chen, H. (2021). *Variable responses of soil pore structure to organic and inorganic fertilization in a Vertisol.. International Agrophysics*, 35(2), 221–225.

- Rusdi, I., Rauf, A., & Hidayat, B. (2019). *Application of biochar from palm oil plants residues on physical properties of Ultisol.* **Journal of Agricultural Science**, 2(2).
- Sajdak, M., Zajemska, M., Ouadi, M., Mucha, W., Misztal, E., Pieszko, C., & Gałko, G. (2023). *Perspectives of Using Sewage Sludge Char in CO₂ Sequestration on Degraded and Brownfield Sites.* **Energies**, 16(9), 3945.
- Samsuri, A. W., Fahmi, A. H., Jol, H., & Daljit, S. (2020). *Particle size and rate of biochar affected the phytoavailability of Cd and Pb by mustard plants grown in contaminated soils.* **International Journal of Phytoremediation**, 22(6), 567–577.
- Schimmelpfennig, S., & Glaser, B. (2012). *One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars.* **Journal of Environmental Quality**, 41(4), 1001–1013.
- Setiani, V., Priastuti, U., & Yuniarta, D. P. (2021). *Improvement of Soil Chemical Properties using Corn Cob Biochar (BTJ).* **Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan**, 18(1), 1–9.
- Srocke, F., Han, L., Dutilleul, P., Xiao, X., Smith, D. L., & Mašek, O. (2021). *Synchrotron X-ray microtomography and multifractal analysis for the characterization of pore structure and distribution in softwood pellet biochar.* **Biochar**, 3(4), 671–686.
- Sui, H., Wang, W., Lin, J., Tang, Z. Q., Yang, D. S., & Duan, W. (2023). *Spatial correlation and pore morphology analysis of limestone calcined clay cement (LC3) via machine learning and image-based characterisation.* **Construction and Building Materials**, 401.

- Szostek, M., Szpunar-Krok, E., Matłok, N., Ilek, A., Słowik, K., & Kuboń, M. (2024). *Acidity and Salinization of Soil Following the Application of Ashes from Biomass Combustion Under Different Crop Plant Species Cultivation..* **Applied Sciences**, 14(21), 9812.
- Tarelho, L. A. C., Hauschild, T., Vilas-boas, A. C. M., Silva, D. F. R., & Matos, M. A. A. (2019). *Biochar from pyrolysis of biological sludge from wastewater treatment..* **Energy Reports**, 22–25.
- Thanh Phong, N., Tag, M., Park, S., Lee, J., Kim, J., Joe, E., Yeon, J., So, H., Kim, B., Seung, M., Young, H., & Jeon, J. (2025). *Crucial factors determining the response of activated sludge-derived fertilizer particles to crop root exudates..* **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 14(1), 120510.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). *Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects..* **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 19(1), 191–215. Springer.
- Vannini, A., Bianchi, E., Avi, D., Damaggio, N., Di Lella, L. A., Nannoni, F., Protano, G., & Loppi, S. (2021). *Biochar Amendment Reduces the Availability of Pb in the Soil and Its Uptake in Lettuce..* **Toxics**, 9(10), 268.
- Varma, A. K., & Mondal, P. (2017). *Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products..* **Industrial Crops and Products**, 95, 704–717.
- Veiga, P. A. da S., Cerqueira, M. H., Gonçalves, M. G., Matos, T. T. da S., Pantano, G., Schultz, J., Andrade, J. B. de, & Mangrich, A. S. (2021). *Upgrading from batch to continuous flow process for the pyrolysis of sugarcane bagasse: Structural characterization of the biochars produced..* **Journal of Environmental Management**, 285.

- Verheijen, F. G. A., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-Hur, M., & Keizer, J. J. (2019). *The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment..* **Geoderma**, 347, 194–202.
- Wara, S. S. M., Adziima, A. F., Nasrudin, M., & Pratama, A. R. (2025). *Evaluasi Kinerja Uji Normalitas pada Ragam Distribusi dan Ukuran Sampel..* **Jurnal Diferensial**, 7(2), 172–183.
- Wei, B., Peng, Y., Lin, L., Zhang, D., Ma, L., Jiang, L., Li, Y., He, T., & Wang, Z. (2023). *Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: A meta-analysis..* **Geoderma**, 437.
- Wei, S., Zhu, M., Fan, X., Song, J., Peng, P., Li, K., Jia, W., & Song, H. (2019). *Influence of pyrolysis temperature and feedstock on carbon fractions of biochar produced from pyrolysis of rice straw, pine wood, pig manure and sewage sludge..* **Chemosphere**, 218, 624–631.
- Wei, Y., Ma, J., Liu, K., Zhang, S., & Wang, J. (2025). *Biochar-Based Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Synergies, and Sustainable Prospects..* **Nanomaterials**, 15(19), 1487.
- Widyantika, S. D., & Prijono, S. (2019). *Effect of High Doses of Rice Husk Biochar on Soil Physical Properties and Growth of Maize on a Typic Kanhapludult..* **Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan**, 6(1), 1157–1163.
- Wigan, M. B. (2023). *Impact of Biochar Application on Chemical and Microbial Properties of Soil..* **International Journal of Multidisciplinary: Applied Business and Education Research**, 4(7), 2503–2510.
- Wu, W., Han, J., Gu, Y., Li, T., Xu, X., Jiang, Y., Li, Y., Sun, J., Pan, G., & Cheng, K. (2022). *Impact of biochar amendment on soil hydrological*

properties and crop water use efficiency: A global meta-analysis and structural equation model.. GCB Bioenergy, 14(6), 657–668.

Zafeer, Mohd. K., Menezes, R. A., Venkatachalam, H., & Bhat, K. S. (2024). *Sugarcane bagasse-based biochar and its potential applications: a review.. Emergent Materials*, 7(1), 133–161.

Zaman, C. Z., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marliana, E., Rafique, R. F., & Johan, R. Bin. (2017). *Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste.. Pyrolysis*, 3–36.

Zhang, J., Jin, J., Wang, M., Naidu, R., Liu, Y., Man, Y. B., Liang, X., Wong, M. H., Christie, P., Zhang, Y., Song, C., & Shan, S. (2020). *Co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk/bamboo sawdust for biochar with high aromaticity and low metal mobility.. Environmental Research*, 191, 110034.

Zhang, L., & Fan, H. (2025). *Research Progress in Soil Hydrodynamics.. Advances in Engineering Research*, 2(1), 1.

Zheng, H., Chen, L., Li, N., Liu, B., Meng, N., Wang, M., & Chen, S. Bao. (2017). *Toxicity threshold of lead (Pb) to nitrifying microorganisms in soils determined by substrate-induced nitrification assay and prediction model.. Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1832–1840.

**LAMPIRAN A PERHITUNGAN
UJI KARAKTERISTIK AWAL TANAH**

Halaman ini sengaja dikosongkan

A. Pengujian Kadar Air

Perhitungan kadar air dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Kadar Air \%} = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100$$

Keterangan dimana:

W1 = massa sampel bahan sebelum dikeringkan (gram)

W2 = massa cawan + sampel sebelum dikeringkan (gram)

W3 = massa sampel bahan setelah dikeringkan (gram)

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Air	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge	Bagasse Tebu
	$\begin{aligned} \text{Kadar Air \%} &= \frac{39,766 - 39,015}{1,000} \times 100 \\ &= \frac{0,751}{1,000} \times 100\% \\ &= \mathbf{75,1\%} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Kadar Air \%} &= \frac{113,038 - 112,71}{1,000} \times 100 \\ &= \frac{0,328}{1,000} \times 100\% \\ &= \mathbf{32,8\%} \end{aligned}$

B. Pengujian Bulk Density (pb)

Perhitungan *bulk density* dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan ISO 7837:1992:

$$\text{Bulk Density} = \frac{\text{massa tanah kering}}{\text{volume tanah}}$$

NO	Perhitungan Pengujian Bulk Density
1	Keterangan Sampel
	Tanah Topsoil
	$\begin{aligned} \text{Bulk density} &= \frac{103,94(g)}{100 (ml)} \\ &= \mathbf{1,0394 g/cm^3} \end{aligned}$

C. Pengujian *Particle Density* (pp)

Perhitungan *particle density* dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan ASTM D854:

$$Particle\ Density = \frac{massa\ partikel}{volume\ partikel}$$

Data Pengukuran:

- a) Berat labu ukur kosong = 56,025 g
- b) Berat labu + air (100 mL) = 161,692 g
- c) Berat labu + air + tanah = 183,424 g
- d) Massa tanah kering = 50 g

NO	Perhitungan Pengujian <i>Particle Density</i>
	Langkah Perhitungan
1	Massa Air Dalam Labu Ukur
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 161,692 - 56,025 \\ &= \mathbf{105,665\ g} \end{aligned}$
2	Massa Total (Tanah + Air)
	$\begin{aligned} \text{Massa total} &= 183,424 - 56,025 \\ &= \mathbf{127,399\ g} \end{aligned}$
3	Massa Air Setelah ditambahkan Tanah
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 127,399 - 50 \\ &= \mathbf{77,399\ g} \end{aligned}$
4	Volume Partikel Tanah (Vs)
	$\begin{aligned} V_s &= 105,667 - 77,399 \\ &= \mathbf{28,268\ cm^3} \end{aligned}$
5	<i>Particle Density</i> (PP)
	$\begin{aligned} PP &= \frac{50}{28,268} \\ &= \mathbf{1,769\ g/cm^3} \end{aligned}$

D. Perhitungan Porositas Tanah

Perhitungan porositas dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan SNI 06-6989.54-2005:

$$Porositas = \left(1 - \frac{pb}{pp}\right) \times 100$$

Keterangan dimana:

pb = *Bulk Density*

pp = *Particle Density*

NO	Perhitungan Pengujian Porositas
1	Keterangan Sampel
	Tanah <i>Topsoil</i>
	$\text{porositas} = \left(1 - \frac{1,0394 \text{ g/cm}^3}{1,769 \text{ g/cm}^3}\right) \times 100$ $= 41,2\%$

Halaman sengaja dikosongkan

**LAMPIRAN B PERHITUNGAN ANALISIS *PROXIMATE*
KARAKTERISTIK BAHAN *BIOCHAR***

Halaman sengaja dikosongkan

A. Pengujian Kadar Air

Perhitungan kadar air dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Kadar Air \%} = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100$$

Keterangan dimana:

W1 = massa sampel bahan sebelum dikeringkan (gram)

W2 = massa cawan + sampel sebelum dikeringkan (gram)

W3 = massa sampel bahan setelah dikeringkan (gram)

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Air	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge	Bagasse Tebu
	$\begin{aligned} \text{Kadar Air \%} &= \frac{39,766 - 39,015}{1,000} \times 100 \\ &= \frac{0,751}{1,000} \times 100\% \\ &= \mathbf{75,1\%} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Kadar Air \%} &= \frac{113,038 - 112,71}{1,000} \times 100 \\ &= \frac{0,328}{1,000} \times 100\% \\ &= \mathbf{32,8\%} \end{aligned}$

B. Pengujian Kadar Abu

Perhitungan kadar abu dapat menggunakan persamaan berikut, berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Kadar Abu \%} = \frac{\text{massa sisa sampel (gram)}}{\text{massa sampel kering tanur (gram)}} \times 100$$

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Abu	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge	Bagasse Tebu
	$\begin{aligned} \text{Kadar Abu \%} &= \frac{0,712(g)}{2,000(g)} \times 100 \\ &= \mathbf{35,6\%} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Kadar Abu \%} &= \frac{0,5056(g)}{2,000(g)} \times 100 \\ &= \mathbf{25,28\%} \end{aligned}$

C. Pengujian *Volatile matter* (*volatile matter*)

Perhitungan *volatile matter* (*volatile matter*) dapat menggunakan persamaan berikut, berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Volatile matter \%} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Keterangan dimana:

W1 = massa sampel bahan awal (gram)

W2 = massa sampel setelah pemanasan (gram)

NO	Perhitungan Pengujian <i>Volatile matter</i>	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge	Bagasse Tebu
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1 - 0,369(g)}{1(g)} \times 100$ $= 63,1\%$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1 - 0,3521(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= 64,79\%$

D. Perhitungan Kadar Karbon Tetap (*fixed carbon*)

Perhitungan kadar karbon tetap (*fixed carbon*) dapat menggunakan persamaan berikut, berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Kadar Karbon Tetap \%} = 100 - (A + B)$$

Keterangan dimana:

A = nilai *volatile matter* (%)

B = nilai kadar abu (%)

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Karbon Tetap	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge	Bagasse Tebu
	$\text{FC\%} = 100 - (35,6 + 63,1)$ $= 1,3\%$	$\text{FC\%} = 100 - (25,28 + 64,79)$ $= 9,93\%$

**LAMPIRAN C PERHITUNGAN ANALISIS *PROXIMATE*
KARAKTERISTIK *BIOCHAR***

Halaman sengaja dikosongkan

A. Pengujian Kadar Air

Perhitungan kadar air dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Kadar Air \%} = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100$$

Keterangan dimana:

W1 = massa sampel bahan sebelum dikeringkan (gram)

W2 = massa cawan + sampel sebelum dikeringkan (gram)

W3 = massa sampel bahan setelah dikeringkan (gram)

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Air	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge 350 °C (A1)	Sludge 350 °C (A1*)
	Kadar Air % = $\frac{52,11-52,180}{1,000} \times 100$ = 3,1%	Kadar Air % = $\frac{52,211-52,179}{1,000} \times 100$ = 3,2%
Rata-rata = $\frac{A1+A1*}{2}$ = $\frac{3,1+3,2}{2}$ = 3,15%		
2	Sludge 500 °C (A2)	Sludge 500 °C (A2*)
	Kadar Air % = $\frac{52,11-52,180}{1,000} \times 100$ = 3,1%	Kadar Air % = $\frac{52,211-52,180}{1,000} \times 100$ = 3,1%
	Rata-rata = $\frac{A2+A2*}{2}$ = $\frac{3,1+3,1}{2}$ = 3,1%	
3	Bagasse 350 °C (B1)	Bagasse 350 °C (B1*)
	Kadar Air % = $\frac{39,762-39,745}{1,000} \times 100$ = 1,7%	Kadar Air % = $\frac{39,762-39,742}{1,000} \times 100$ = 2%
	Rata-rata = $\frac{B1+B1*}{2}$ = $\frac{1,7+2}{2}$ = 1,85%	

Perhitungan Pengujian Kadar Air		
Keterangan Sampel		
4	Bagasse 500 °C (B2)	Bagasse 500 °C (B2*)
	Kadar Air % = $\frac{39,762-39,749}{1,000} \times 100$ = 1,3%	Kadar Air % = $\frac{39,762-39,747}{1,000} \times 100$ = 1,5%
Rata-rata = $\frac{B2+B2*}{2}$ = $\frac{1,3+1,5}{2}$ = 1,4%		
5	Sludge+Bagasse (Post-mix) 350 °C (C1)	Sludge+Bagasse 350 °C (C1*)
	Kadar Air % = $\frac{39,766-39,750}{1,000} \times 100$ = 1,6%	Kadar Air % = $\frac{39,766-39,749}{1,000} \times 100$ = 1,7%
Rata-rata = $\frac{C1+C1*}{2}$ = $\frac{1,6+1,7}{2}$ = 1,65%		
6	Sludge+Bagasse (Post-mix) 500 °C (C2)	Sludge+Bagasse (Post-mix) 500 °C (C2*)
	Kadar Air % = $\frac{39,762-39,750}{1,000} \times 100$ = 1,6%	Kadar Air % = $\frac{52,211-52,750}{1,000} \times 100$ = 1,6%
Rata-rata = $\frac{C2+C2*}{2}$ = $\frac{1,6+1,6}{2}$ = 1,6%		
7	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 350 °C (D1)	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 350 °C (D1*)
	Kadar Air % = $\frac{53,902-53,878}{1,000} \times 100$ = 2,4%	Kadar Air % = $\frac{53,902-53,877}{1,000} \times 100$ = 2,5%
Rata-rata = $\frac{D1+D1*}{2}$ = $\frac{2,4+2,5}{2}$ = 2,45%		
8	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 500 °C (D2)	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 500 °C (D2*)
	Kadar Air % = $\frac{53,902-53,882}{1,000} \times 100$ = 2%	Kadar Air % = $\frac{53,902-53,879}{1,000} \times 100$ = 2,3%
Rata-rata = $\frac{D2+D2*}{2}$ = $\frac{2+2,3}{2}$ = 2,15%		

B. Pengujian Kadar Abu

Perhitungan kadar abu dapat menggunakan persamaan berikut, berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Kadar Abu \%} = \frac{\text{massa sisa sampel (gram)}}{\text{massa sampel kering tanur (gram)}} \times 100$$

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Abu	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge 350 °C (A1)	Sludge 350 °C (A1*)
	Kadar Abu % = $\frac{1,078(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 53,9%	Kadar Abu % = $\frac{1,087(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 54,15%
Rata-rata = $\frac{A1+A1*}{2}$ = $\frac{53,9+54,15}{2}$ = 54,15%		
2	Sludge 500 °C (A2)	Sludge 500 °C (A2*)
	Kadar Abu % = $\frac{1,280(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 64%	Kadar Abu % = $\frac{1,265(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 63,3%
	Rata-rata = $\frac{A2+A2*}{2}$ = $\frac{64+63,3}{2}$ = 63,65%	
3	Bagasse 350 °C (B1)	Bagasse Tebu 350 °C (B1)
	Kadar Abu % = $\frac{0,549(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 27,5%	Kadar Abu % = $\frac{0,578(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 28,2%
	Rata-rata = $\frac{B1+B1*}{2}$ = $\frac{27,5+28,2}{2}$ = 28,2%	
4	Bagasse 500 °C (B2)	Bagasse 500 °C (B2*)
	Kadar Abu % = $\frac{0,682(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 34,1%	Kadar Abu % = $\frac{0,652(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 32,6%
	Rata-rata = $\frac{B2+B2*}{2}$ = $\frac{34,1+32,6}{2}$ = 33,35%	
5	Sludge+Bagasse (Post-mix) 350 °C (C1)	Sludge+Bagasse (Post-mix) 350 °C (C1*)
	Kadar Abu % = $\frac{0,648(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 30,7%	Kadar Abu % = $\frac{0,648(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 32,4%
	Rata-rata = $\frac{C1+C1*}{2}$ = $\frac{30,7+32,4}{2}$ = 31,55%	

Perhitungan Pengujian Kadar Abu		
Keterangan Sampel		
6	Sludge+Bagasse (Post-mix) 500 °C (C2)	Sludge+Bagasse (Post-mix) 500 °C (C2*)
	Kadar Abu % = $\frac{0,698(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 34,9%	Kadar Abu % = $\frac{0,729(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 36,4%
Rata-rata = $\frac{C2+C2*}{2}$ = $\frac{34,9+36,4}{2}$ = 35,65%		
7	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 350 °C (D1)	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 350 °C (D1*)
	Kadar Abu % = $\frac{0,705(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 35,3%	Kadar Abu % = $\frac{0,686(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 34,3%
Rata-rata = $\frac{D1+D1*}{2}$ = $\frac{35,3+34,3}{2}$ = 34,8%		
8	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 500 °C (D2)	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 500 °C (D2*)
	Kadar Abu % = $\frac{0,805(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 40,3%	Kadar Abu % = $\frac{0,846(g)}{2,000(g)} \times 100$ = 42,3%
Rata-rata = $\frac{D2+D2*}{2}$ = $\frac{40,3+42,3}{2}$ = 41,3%		

C. Pengujian *Volatile matter* (*volatile matter*)

Perhitungan *volatile matter* (*volatile matter*) dapat menggunakan persamaan berikut, berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Volatile matter \%} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Keterangan dimana:

W1 = massa sampel bahan awal (gram)

W2 = massa sampel setelah pemanasan (gram)

NO	Perhitungan Pengujian <i>Volatile matter</i>	
1	Keterangan Sampel	
	Sludge 350 °C (A1)	Sludge 350 °C (A1*)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,591(g)}{1(g)} \times 100$ $= 40,9\%$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,621(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= 37,9\%$
$\text{Rata-rata} = \frac{A1+A1*}{2}$ $= \frac{40,9+37,9}{2}$ $= 39,4\%$		
2	Sludge 500 °C (A2)	Sludge 500 °C (A2*)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,720(g)}{1(g)} \times 100$ $= 28\%$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,722(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= 27,8\%$
$\text{Rata-rata} = \frac{A2+A2*}{2}$ $= \frac{28+27,8}{2}$ $= 27,9\%$		
3	Bagasse 350 °C (B1)	Bagasse Tebu 350 °C (B1)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,658(g)}{1(g)} \times 100$ $= 34,2\%$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,638(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= 36,2\%$
$\text{Rata-rata} = \frac{B1+B1*}{2}$ $= \frac{34,2+36,2}{2}$ $= 35,2\%$		
4	Bagasse 500 °C (B2)	Bagasse 500 °C (B2*)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,682(g)}{1(g)} \times 100$ $= 31,8\%$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,793(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= 20,7\%$
$\text{Rata-rata} = \frac{B2+B2*}{2}$ $= \frac{31,8+20,7}{2}$ $= 26,25\%$		
5	Sludge+Bagasse (Post-mix) 350 °C (C1)	Sludge+Bagasse (Post-mix)350 °C (C1*)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,705(g)}{1(g)} \times 100$ $= 29,5\%$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,697(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= 30,3\%$
$\text{Rata-rata} = \frac{C1+C1*}{2}$ $= \frac{29,5+30,3}{2}$ $= 29,9\%$		

6	Perhitungan Pengujian <i>Volatile matter</i>	
	Keterangan Sampel	
	Sludge+Bagasse (Post-mix) 500 °C (C2)	Sludge+Bagasse 500 °C (C2*)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,700(g)}{1(g)} \times 100$ $= \mathbf{30\%}$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,702(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= \mathbf{29,9\%}$
$\text{Rata-rata} = \frac{C2+C2*}{2}$ $= \frac{30+29,9}{2}$ $= \mathbf{29,95\%}$		
7	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 350 °C (D1)	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 350 °C (D1*)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,743(g)}{1(g)} \times 100$ $= \mathbf{25,7\%}$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,731(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= \mathbf{26,9\%}$
$\text{Rata-rata} = \frac{D1+D1*}{2}$ $= \frac{25,7+26,9}{2}$ $= \mathbf{26,3\%}$		
8	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 500 °C (D2)	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 500 °C (D2*)
	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,808(g)}{1(g)} \times 100$ $= \mathbf{19,3\%}$	$\text{Volatile matter \%} = \frac{1-0,815(g)}{1,000(g)} \times 100$ $= \mathbf{18,5\%}$
$\text{Rata-rata} = \frac{D2+D2*}{2}$ $= \frac{19,3+18,5}{2}$ $= \mathbf{18,9\%}$		

D. Perhitungan Kadar Karbon Tetap (*fixed carbon*)

Perhitungan kadar karbon tetap (*fixed carbon*) dapat menggunakan persamaan berikut, berdasarkan ASTM D3172–D3175:

$$\text{Kadar Karbon Tetap \%} = 100 - (A + B)$$

Keterangan dimana:

A = nilai *volatile matter* (%)

B = nilai kadar abu (%)

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Karbon Tetap
1	Keterangan Sampel
	Sludge 350 °C
	$\text{FC\%} = 100 - (54,15 + 39,4)$ $= \mathbf{6,45\%}$
2	Sludge 500 °C
	$\text{FC\%} = 100 - (63,65 + 27,9)$ $= \mathbf{8,45\%}$
3	Bagasse 350 °C
	$\text{FC\%} = 100 - (28,2 + 35,2)$ $= \mathbf{36,6\%}$
4	Bagasse 500 °C
	$\text{FC\%} = 100 - (33,35 + 26,25)$ $= \mathbf{40,4\%}$
5	Sludge+Bagasse (Post-mix) 350 °C
	$\text{FC\%} = 100 - (31,55 + 29,9)$ $= \mathbf{38,55\%}$

NO	Perhitungan Pengujian Kadar Karbon Tetap
6	Keterangan Sampel
	Sludge+Bagasse (Post-mix) 500 °C
	$FC\% = 100 - (35,65 + 29,95)$ $= \mathbf{34,4\%}$
7	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 350 °C
	$FC\% = 100 - (34,8 + 26,3)$ $= \mathbf{38,9\%}$
8	Sludge+Bagasse (Pre-Mix) 500 °C
	$FC\% = 100 - (41,3 + 18,9)$ $= \mathbf{39,8\%}$

**LAMPIRAN D PENGUJIAN STATISTIKA DAN
PERHITUNGAN SKORING MULTIKRITERIA**

*Halaman Sengaja Dikosongkan

A. Uji Normalitas Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk

Tests of Normality ^a						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Kadar Air	.165	16	.200 [*]	.882	16	.042
Kadar Abu	.253	16	.007	.832	16	.007
Volatile Matter	.118	16	.200 [*]	.964	16	.738
Fixed Carbon	.343	16	.000	.752	16	.001
Derajat Keasaman	.115	16	.200 [*]	.933	16	.274
Konduktivitas	.226	16	.028	.857	16	.018

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

B. Uji Normalitas Skewness dan Kurtosis

Descriptive Statistics										
	N	Minimum	Maximum	Mean		Std. Deviation	Skewness		Kurtosis	
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
Kadar Air	16	1.36	3.19	2.1688	.16351	.65405	.526	.564	-1.255	1.091
Kadar Abu	16	27.45	64.02	40.3231	2.97743	11.90973	1.099	.564	-.097	1.091
Volatile Matter	16	18.52	40.87	29.2281	1.58364	6.33457	-.055	.564	-.266	1.091
Fixed Carbon	16	5.23	46.70	30.4006	3.50989	14.03956	-1.089	.564	-.525	1.091
Derajat Keasaman	16	7.89	8.94	8.3181	.08467	.33869	.417	.564	-.927	1.091
Konduktivitas	16	270.00	976.00	716.3125	60.61674	242.46697	-.572	.564	-.816	1.091
Valid N (listwise)	16									

Rasio skewness dan kurtosis dihitung menggunakan persamaan:

Rasio Skewness = Nilai Skewness / Std. Error Skewness

Rasio Kurtosis = Nilai Kurtosis / Std. Error Kurtosis

Data dinyatakan berdistribusi normal apabila nilai rasio skewness dan kurtosis berada pada rentang $\pm 1,98$.

Skewness	Kurtosis
Kadar Air	
0,526	-1,255
0,564	1,091
= 0,932	= 1,150
Kadar Abu	
1,099	-0,097
0,564	1,091
= 1,948	= -0,088
Volatile Matter	
0,055	-0,266
0,564	1,091
= 0,097	= -0,243
Fixed Carbon	

Skewness	Kurtosis
$\frac{-1,089}{0,564}$ = -1,930	$\frac{-0,525}{1,091}$ = -0,481
Derajat Keasaman (pH)	
$\frac{0,417}{0,564}$ = 0,739	$\frac{-0,927}{1,091}$ = -0,849
Elctrical Conductivity (EC)	
$\frac{-0,572}{0,564}$ = -1,014	$\frac{-0,816}{1,091}$ = -0,747

C. Uji Homogenitas Berdasarkan Jenis *Biochar* Lavene Statistic

Test of Homogeneity of Variances		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Kadar Air	Based on Mean	20.056	3	12	.000
	Based on Median	19.954	3	12	.000
	Based on Median and with adjusted df	19.954	3	9.516	.000
	Based on trimmed mean	20.055	3	12	.000
Kadar Abu	Based on Mean	8.441	3	12	.003
	Based on Median	8.107	3	12	.003
	Based on Median and with adjusted df	8.107	3	9.827	.005
	Based on trimmed mean	8.437	3	12	.003
Volatile Matter	Based on Mean	5.823	3	12	.011
	Based on Median	2.899	3	12	.079
	Based on Median and with adjusted df	2.899	3	3.529	.181
	Based on trimmed mean	5.161	3	12	.016
Fixed Carbon	Based on Mean	2.962	3	12	.075
	Based on Median	2.135	3	12	.149
	Based on Median and with adjusted df	2.135	3	4.175	.234
	Based on trimmed mean	2.959	3	12	.075
Konduktivitas	Based on Mean	697.005	3	12	.000
	Based on Median	523.585	3	12	.000
	Based on Median and with adjusted df	523.585	3	4.219	.000
	Based on trimmed mean	694.166	3	12	.000
Derajat Keasaman	Based on Mean	18.538	3	12	.000
	Based on Median	17.190	3	12	.000
	Based on Median and with adjusted df	17.190	3	6.261	.002
	Based on trimmed mean	18.520	3	12	.000

D. Uji Homogenitas Berdasarkan Suhu *Pyrolysis* Lavene Statistic

Test of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Kadar Air	Based on Mean	.053	1	14	.822
	Based on Median	.041	1	14	.842
	Based on Median and with adjusted df	.041	1	12.910	.843
	Based on trimmed mean	.052	1	14	.822
Kadar Abu	Based on Mean	.245	1	14	.629
	Based on Median	.129	1	14	.725
	Based on Median and with adjusted df	.129	1	13.578	.725
	Based on trimmed mean	.201	1	14	.661
Volatile Matter	Based on Mean	.009	1	14	.928
	Based on Median	.069	1	14	.797
	Based on Median and with adjusted df	.069	1	11.834	.798
	Based on trimmed mean	.006	1	14	.940
Fixed Carbon	Based on Mean	.025	1	14	.876
	Based on Median	.010	1	14	.920
	Based on Median and with adjusted df	.010	1	13.270	.921
	Based on trimmed mean	.009	1	14	.927
Konduktivitas	Based on Mean	2.943	1	14	.108
	Based on Median	2.436	1	14	.141
	Based on Median and with adjusted df	2.436	1	7.470	.160
	Based on trimmed mean	2.936	1	14	.109
Derajat Keasaman	Based on Mean	4.473	1	14	.053
	Based on Median	3.640	1	14	.077
	Based on Median and with adjusted df	3.640	1	9.008	.089
	Based on trimmed mean	4.468	1	14	.053

E. Uji Multivariate Test (Manova)

Multivariate Tests ^a							
Effect		Value	F	Hypothesis df	Error df	Sig.	Partial Eta Squared
Intercept	Pillai's Trace	1.000	611216.720 ^b	6.000	3.000	.000	1.000
	Wilks' Lambda	.000	611216.720 ^b	6.000	3.000	.000	1.000
	Hotelling's Trace	1222433.441	611216.720 ^b	6.000	3.000	.000	1.000
	Roy's Largest Root	1222433.441	611216.720 ^b	6.000	3.000	.000	1.000
Suhu	Pillai's Trace	.998	203.573 ^b	6.000	3.000	.001	.998
	Wilks' Lambda	.002	203.573 ^b	6.000	3.000	.001	.998
	Hotelling's Trace	407.146	203.573 ^b	6.000	3.000	.001	.998
	Roy's Largest Root	407.146	203.573 ^b	6.000	3.000	.001	.998
Tipe	Pillai's Trace	2.914	28.229	18.000	15.000	.000	.971
	Wilks' Lambda	.000	223.519	18.000	8.971	.000	.997
	Hotelling's Trace	7286.913	674.714	18.000	5.000	.000	1.000
	Roy's Largest Root	6892.153	5743.461 ^c	6.000	5.000	.000	1.000
Suhu * Tipe	Pillai's Trace	2.460	3.794	18.000	15.000	.006	.820
	Wilks' Lambda	.000	16.410	18.000	8.971	.000	.964
	Hotelling's Trace	896.366	82.997	18.000	5.000	.000	.997
	Roy's Largest Root	885.390	737.825 ^c	6.000	5.000	.000	.999

a. Design: Intercept + Suhu + Tipe + Suhu * Tipe

b. Exact statistic

c. The statistic is an upper bound on F that yields a lower bound on the significance level.

F. Uji Signifikansi Individual (Test of Between-Subject)

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	Kadar Air	.000	.996
	Kadar Abu	.000	.996
	Fixed Carbon	.000	.967
	Volatile Matter	.003	.885
	Derajat Keasaman	.000	.979
	Konduktivitas	.000	1.000
Intercept	Kadar Air	.000	1.000
	Kadar Abu	.000	1.000
	Fixed Carbon	.000	.993
	Volatile Matter	.000	.995
	Derajat Keasaman	.000	1.000
	Konduktivitas	.000	1.000
Suhu	Kadar Air	.000	.868
	Kadar Abu	.000	.954
	Fixed Carbon	.683	.022
	Volatile Matter	.001	.737
	Derajat Keasaman	.000	.914
	Konduktivitas	.000	.995
Tipe	Kadar Air	.000	.996
	Kadar Abu	.000	.996
	Fixed Carbon	.000	.967
	Volatile Matter	.004	.792
	Derajat Keasaman	.000	.969
	Konduktivitas	.000	1.000
Suhu * Tipe	Kadar Air	.003	.810
	Kadar Abu	.023	.678
	Fixed Carbon	.436	.276
	Volatile Matter	.107	.514
	Derajat Keasaman	.002	.839
	Konduktivitas	.000	.995
Error	Kadar Air		
	Kadar Abu		
	Fixed Carbon		
	Volatile Matter		
	Derajat Keasaman		
	Konduktivitas		

G. Perhitungan *Weighted Multi-Criteria Assessment*

Data Uji Proksimat & Kimia (Seluruh Sampel 350°C & 500°C)							
Sampel Biochar	Suhu (°C)	Moisture (%)	Ash (%)	VM (%)	FC (%)	pH	EC (µS/cm)
Sludge 350°C	350	3,15	54,15	39,40	6,45	8,20	936
Sludge 500°C	500	3,10	63,65	27,90	8,45	8,94	924
Bagasse 350°C	350	1,85	28,20	35,20	36,60	7,97	270
Bagasse 500°C	500	1,40	33,35	26,25	40,40	7,90	580
Post-mix 350°C	350	1,65	31,55	29,90	38,55	7,97	270
Post-mix 500°C	500	1,60	35,65	29,95	34,40	7,90	580
Pre-mix (Co-pyrolysis) 350°C	350	2,45	34,80	26,30	38,90	8,37	862
Pre-mix (Co-pyrolysis) 500°C	500	2,15	41,30	18,90	39,80	8,68	972

Konversi Nilai Parameter ke Skala 1 - 5 (Berdasarkan 8 Sampel)							
Sampel Biochar	Suhu (°C)	Moisture (%)	Ash (%)	VM (%)	FC (%)	pH	EC (µS/cm)
Sludge 350°C	350	1,00	3,93	1,00	1,00	2,15	4,79
Sludge 500°C	500	1,11	5,00	3,24	1,24	5,00	4,73
Bagasse 350°C	350	3,97	1,00	1,82	4,55	1,27	1,00
Bagasse 500°C	500	5,00	1,58	3,57	5,00	1,00	2,77
Post-mix 350°C	350	4,43	1,38	2,85	4,78	1,27	1,00
Post-mix 500°C	500	4,54	1,84	2,84	4,29	1,00	2,77
Pre-mix (Co-pyrolysis) 350°C	350	2,60	1,74	3,56	4,82	2,81	4,37
Pre-mix (Co-pyrolysis) 500°C	500	3,29	2,48	5,00	4,93	4,00	5,00

Nilai Total & Ranking (Pembuktian Suhu 500°C Lebih Baik)									
Sampel Biochar	Suhu (°C)	Moisture (%)	Ash (%)	VM (%)	FC (%)	pH	EC (µS/cm)	Total Skor	Ranking
Pre-mix (Co-pyrolysis) 500°C	500	0,33	0,25	0,75	1,48	1,00	0,50	4,31	1
Pre-mix (Co-pyrolysis) 350°C	350	0,26	0,17	0,53	1,45	0,70	0,44	3,55	2
Bagasse 500°C	500	0,50	0,16	0,53	1,50	0,25	0,28	3,22	3
Sludge 500°C	500	0,11	0,50	0,49	0,37	1,25	0,47	3,19	4
Post-mix 500°C	500	0,45	0,18	0,43	1,29	0,25	0,28	2,88	5
Post-mix 350°C	350	0,44	0,14	0,43	1,43	0,32	0,10	2,86	6
Bagasse 350°C	350	0,40	0,10	0,27	1,37	0,32	0,10	2,55	7
Sludge 350°C	350	0,10	0,39	0,15	0,30	0,54	0,48	1,96	8

**LAMPIRAN F PERHITUNGAN UJI KARAKTERISTIK
TANAH SETELAH PERLAKUAN**

Halaman Sengaja Dikosongkan

A. Pengujian *Bulk Density* (pb)

Perhitungan *bulk density* dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan ISO 7837:1992:

$$\text{Bulk Density} = \frac{\text{massa tanah kering}}{\text{volume tanah}}$$

NO	Perhitungan Pengujian <i>Bulk Density</i>
1	Keterangan Sampel
	K0 (Kontrol)
	$\text{Bulk density} = \frac{113,2(g)}{100 (ml)}$ $= 1,132 \text{ g/cm}^3$
2	P1
	$\text{Bulk density} = \frac{111,5(g)}{100 (ml)}$ $= 1,115 \text{ g/cm}^3$
3	P2
	$\text{Bulk density} = \frac{90,9(g)}{100 (ml)}$ $= 0,909 \text{ g/cm}^3$
4	P3
	$\text{Bulk density} = \frac{98,7(g)}{100 (ml)}$ $= 0,987 \text{ g/cm}^3$
5	P4
	$\text{Bulk density} = \frac{95,9(g)}{100 (ml)}$ $= 0,959 \text{ g/cm}^3$

B. Pengujian *Particle Density* (pp)

Perhitungan *particle density* dapat menggunakan persamaan berikut berdasarkan ASTM D854:

$$\text{Particle Density} = \frac{\text{massa partikel}}{\text{volume partikel}}$$

Data Pengukuran (K0):

- a) Berat labu ukur kosong = 55,980 g
- b) Berat labu + air (100 mL) = 161,650 g
- c) Berat labu + air + tanah = 182,290 g
- d) Massa tanah kering = 50 g

NO	Perhitungan Pengujian <i>Particle Density</i>
	Langkah Perhitungan
1	Massa Air Dalam Labu Ukur
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 161,650 - 55,980 \\ &= \mathbf{105,670 \text{ g}} \end{aligned}$
2	Massa Total (Tanah + Air)
	$\begin{aligned} \text{Massa total} &= 182,290 - 55,980 \\ &= \mathbf{126,310 \text{ g}} \end{aligned}$
3	Massa Air Setelah ditambahkan Tanah
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 126,310 - 50 \\ &= \mathbf{76,310 \text{ g}} \end{aligned}$
4	Volume Partikel Tanah (Vs)
	$\begin{aligned} V_s &= \frac{105,670}{1,704} \\ &= \mathbf{29,360 \text{ cm}^3} \end{aligned}$
5	<i>Particle Density</i> (PP)
	$\begin{aligned} PP &= \frac{50}{29,360} \\ &= \mathbf{1,704 \text{ g/cm}^3} \end{aligned}$

Data Pengukuran (P1):

- a) Berat labu ukur kosong = 56,120 g
- b) Berat labu + air (100 mL) = 161,800 g
- c) Berat labu + air + tanah = 183,808 g
- d) Massa tanah kering = 50 g

NO	Perhitungan Pengujian <i>Particle Density</i>
	Langkah Perhitungan
1	Massa Air Dalam Labu Ukur
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 161,800 - 56,120 \\ &= \mathbf{105,680 \text{ g}} \end{aligned}$
2	Massa Total (Tanah + Air)
	$\begin{aligned} \text{Massa total} &= 183,808 - 56,120 \\ &= \mathbf{127,688 \text{ g}} \end{aligned}$
3	Massa Air Setelah ditambahkan Tanah
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 127,688 - 50 \\ &= \mathbf{77,688 \text{ g}} \end{aligned}$
4	Volume Partikel Tanah (V_s)
	$\begin{aligned} V_s &= 105,680 - 77,688 \\ &= \mathbf{30,248 \text{ cm}^3} \end{aligned}$
5	<i>Particle Density</i> (PP)
	$\begin{aligned} PP &= \frac{50}{30,248} \\ &= \mathbf{1,653 \text{ g/cm}^3} \end{aligned}$

Data Pengukuran (P2):

- a) Berat labu ukur kosong = 56,050 g
- b) Berat labu + air (100 mL) = 161,720 g
- c) Berat labu + air + tanah = 184,738 g
- d) Massa tanah kering = 50 g

NO	Perhitungan Pengujian <i>Particle Density</i>
	Langkah Perhitungan
1	Massa Air Dalam Labu Ukur
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 161,720 - 56,050 \\ &= \mathbf{105,670 \text{ g}} \end{aligned}$
2	Massa Total (Tanah + Air)
	$\begin{aligned} \text{Massa total} &= 184,738 - 56,050 \\ &= \mathbf{128,688 \text{ g}} \end{aligned}$
3	Massa Air Setelah ditambahkan Tanah
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 128,688 - 50 \\ &= \mathbf{78,688 \text{ g}} \end{aligned}$
4	Volume Partikel Tanah (V_s)
	$\begin{aligned} V_s &= 105,670 - 78,688 \\ &= \mathbf{31,348 \text{ cm}^3} \end{aligned}$
5	<i>Particle Density</i> (PP)
	$\begin{aligned} PP &= \frac{50}{31,348} \\ &= \mathbf{1,595 \text{ g/cm}^3} \end{aligned}$

Data Pengukuran (P3):

- a) Berat labu ukur kosong = 56,010 g
- b) Berat labu + air (100 mL) = 161,680 g
- c) Berat labu + air + tanah = 184,473 g
- d) Massa tanah kering = 50 g

NO	Perhitungan Pengujian <i>Particle Density</i>
	Langkah Perhitungan
1	Massa Air Dalam Labu Ukur
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 161,680 - 56,010 \\ &= \mathbf{105,670 \text{ g}} \end{aligned}$
2	Massa Total (Tanah + Air)
	$\begin{aligned} \text{Massa total} &= 184,473 - 56,010 \\ &= \mathbf{128,463 \text{ g}} \end{aligned}$
3	Massa Air Setelah ditambahkan Tanah
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 128,463 - 50 \\ &= \mathbf{78,463 \text{ g}} \end{aligned}$
4	Volume Partikel Tanah (V_s)
	$\begin{aligned} V_s &= 105,670 - 78,463 \\ &= \mathbf{31,133 \text{ cm}^3} \end{aligned}$
5	<i>Particle Density</i> (PP)
	$\begin{aligned} \text{PP} &= \frac{50}{31,133} \\ &= \mathbf{1,606 \text{ g/cm}^3} \end{aligned}$

Data Pengukuran (P4):

- a) Berat labu ukur kosong = 56,090 g
- b) Berat labu + air (100 mL) = 161,760 g
- c) Berat labu + air + tanah = 184,641 g
- d) Massa tanah kering = 50 g

NO	Perhitungan Pengujian <i>Particle Density</i>
	Langkah Perhitungan
1	Massa Air Dalam Labu Ukur
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 161,760 - 56,090 \\ &= \mathbf{105,670 \text{ g}} \end{aligned}$
2	Massa Total (Tanah + Air)
	$\begin{aligned} \text{Massa total} &= 184,641 - 56,090 \\ &= \mathbf{128,551 \text{ g}} \end{aligned}$
3	Massa Air Setelah ditambahkan Tanah
	$\begin{aligned} \text{Massa air} &= 128,551 - 50 \\ &= \mathbf{78,551 \text{ g}} \end{aligned}$
4	Volume Partikel Tanah (V_s)
	$\begin{aligned} V_s &= 105,670 - 78,551 \\ &= \mathbf{31,211 \text{ cm}^3} \end{aligned}$
5	<i>Particle Density</i> (PP)
	$\begin{aligned} PP &= \frac{50}{31,211} \\ &= \mathbf{1,602 \text{ g/cm}^3} \end{aligned}$

**LAMPIRAN G PENGUJIAN KETERSEDIAAN LOGAM
BERAT TIMBAL (Pb) DI TANAH**

Halaman sengaja dikosongkan

A. Perhitungan Efisiensi Removal Pb

Perhitungan efisiensi removal pb dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Removal (\%) = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Keterangan;

A = Konsentrasi pb ditanah tanpa perlakuan (Kontrol (K0))

B= Konsentrasi pb pada tanah dengan perlakuan (P1, P2, P3, P4)

No	Perhitungan Efisiensi Removal
	Keterangan Sampel
1	P1 $\frac{80,345 \text{ mg/L} - 39,23 \text{ mg/L}}{80,345} \times 100$ $= 51,17\%$
2	P2 $\frac{80,345 \text{ mg/L} - 49,08 \text{ mg/L}}{80,345} \times 100$ $= 38,9\%$
3	P3 $\frac{80,345 \text{ mg/L} - 19,73 \text{ mg/L}}{80,345} \times 100$ $= 75,44\%$
4	P4 $\frac{80,345 \text{ mg/L} - 17,47 \text{ mg/L}}{80,345} \times 100$ $= 78,25\%$



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
DIREKTORAT KERJASAMA DAN PENGELOLAAN USAHA (DKPU)
LABORATORIUM ENERGI DAN LINGKUNGAN
Gedung Research Center Lt. 5, Kampus ITS Sukolilo Surabaya 60111
Telp. (031) 5944792; Ext. 1113; Fax. (031) 5996670; Hp: 081331078833
Website: www.its.ac.id/dkpu, Email: lab.energi.lingkungan.its@gmail.com

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
No: 167/LHP/LEL-ITS/VI/2026

Nama Pemilik : Deul Tirta Yuda Legawa
Alamat Pemilik : Jalan Semolowaru Utara III No. 28, Surabaya, Jawa Timur
Nama Contoh : **Terlampir** Tanggal Terima : 25 Mei 2026
Deskripsi Contoh : Bentuk : Padat/Cair/Gas Tanggal Pengujian : 02 Mei 2026
Volume : - Tanggal Selesai :
Kemasan : Botol Pengujian : 02 Juni 2026
Kode Contoh : 260525-001-017 Jumlah Contoh : 5

Menyatakan bahwa contoh tersebut di atas telah diuji di Laboratorium Energi dan Lingkungan DKPU ITS.

Hasil Pengujian (Terlampir)

Suhu : 23,7 °C
Humidity : 65 %
Analisis : DPS

Catatan:

1. Hasil pengujian hanya berlaku untuk sampel yang diuji.
2. Laboratorium tidak bertanggung jawab atas kerugian pada pihak ke tiga.
3. Laporan hasil pengujian hanya boleh diperbanyak secara utuh.

Surabaya, 08 Juni 2026
Kepala Laboratorium
Energi dan Lingkungan ITS



Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197801152003121002

Koordinator Teknis

Vita Yuliana, S.Si.
NPP. 1990201822404



Lampiran 1 dari 1

Nomor : 167/LHP/LEL-ITS/VI/2026

No.	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil	Satuan	Metode Pengujian
1.	K0	Timbal (Pb)	80,345	mg/L	AAS-Flame
2.	P1		39,23		
3.	P2		49,08		
4.	P3		19,73		
5.	P4		17,47		

Koordinator Teknis

Vita Yuliana, S.Si.
NPP. 1990201822404

Halaman sengaja dikosongkan

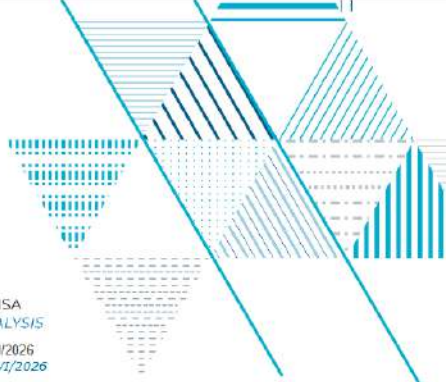
**LAMPIRAN H HASIL PENGUJIAN KARAKTERISTIK
LANJUTAN *BIOCHAR* DAN TANAH TERREMEDIASI**

Halaman Sengaja Dikosongkan

A. Pengujian FTIR Pada *Biochar* dan Tanah Terremediasi



LIFE
LIFE SCIENCE INTEGRATED FACILITIES



Halaman 1 dari 1
Page 1 of 1

SERTIFIKAT ANALISA
CERTIFICATE OF ANALYSIS

Nomer : 347/LIFe/BA/VI/2026
Number : 347/LIFe/BA/VI/2026

SAMPLE INDENTITY

Nama Perusahaan : Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Name of Principal

Alamat Perusahaan : Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60111
Address of Principal

Tanggal Terima Sampel : 12 Juni 2026
Date of Sample Received

Tanggal Analisis : 18 Juni 2026
Date of Analysis

Nama Sample : B2, D4, P4
Sample Name

Nomor Proyek : 125/LIFe/SEM/VI/2026
Project number

Produsen : Deul litayuda legawa
Manufacture

Hasil Analisis
Result of analysis

Parameter <i>Parameter</i>	Satuan <i>Unit</i>	Hasil <i>Result</i>	Metode <i>Method</i>
Morfologi + Elemental	NA	Terlampir	Analisis SEM + EDX

Dibuat Oleh:
Prepared By:



(Estly Purwati)

Dikaji Oleh:
Reviewed By:



(Prof. Putu Dody Sutrisna Ph.D.)

Disetujui Oleh:
Approved By:



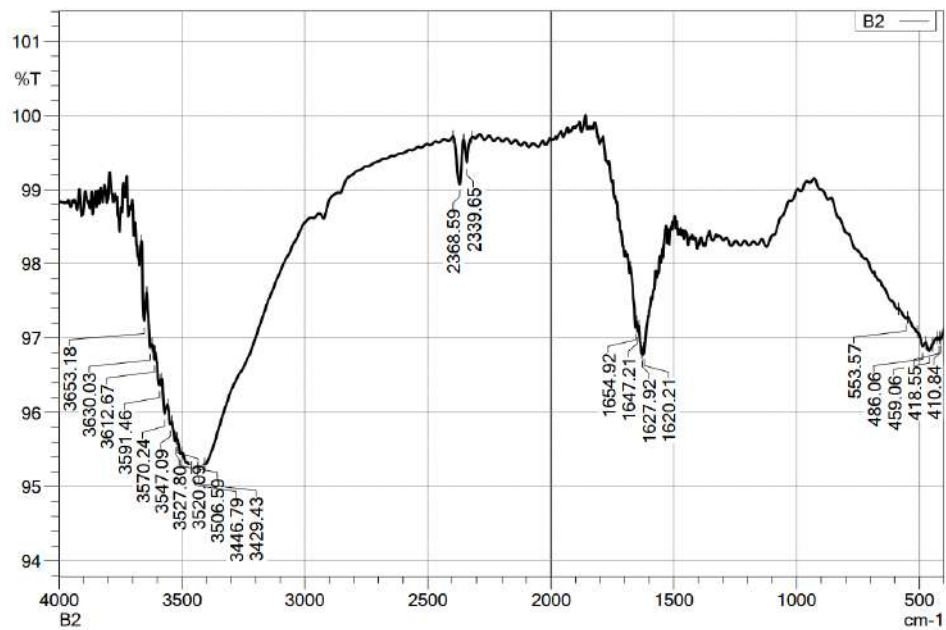
(apt. Eko Seliawan Ph.D.)

+62-31-298-1352
Ext. 4991

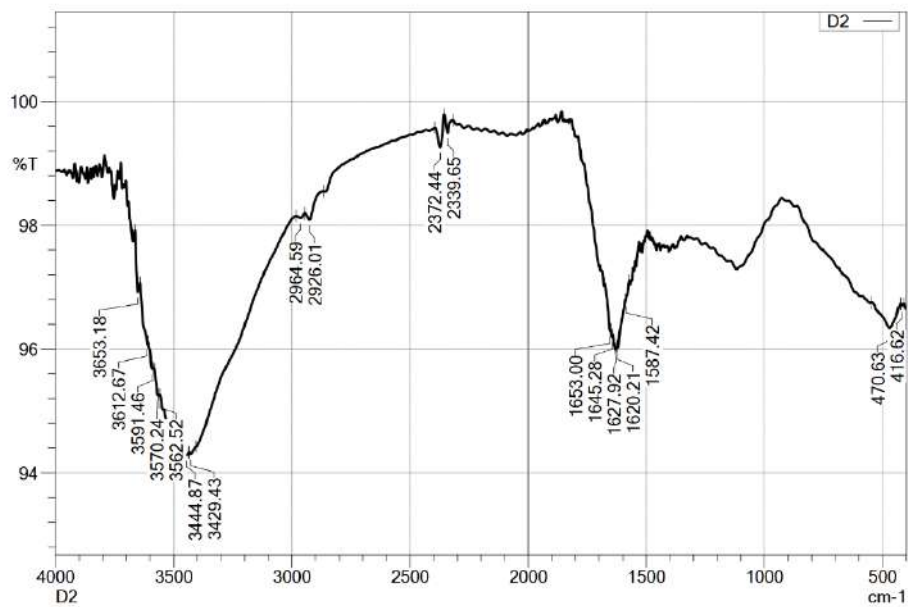
+62-813-2551-866
(Text Only)

life_integratedservices
@unitubaya.ac.id

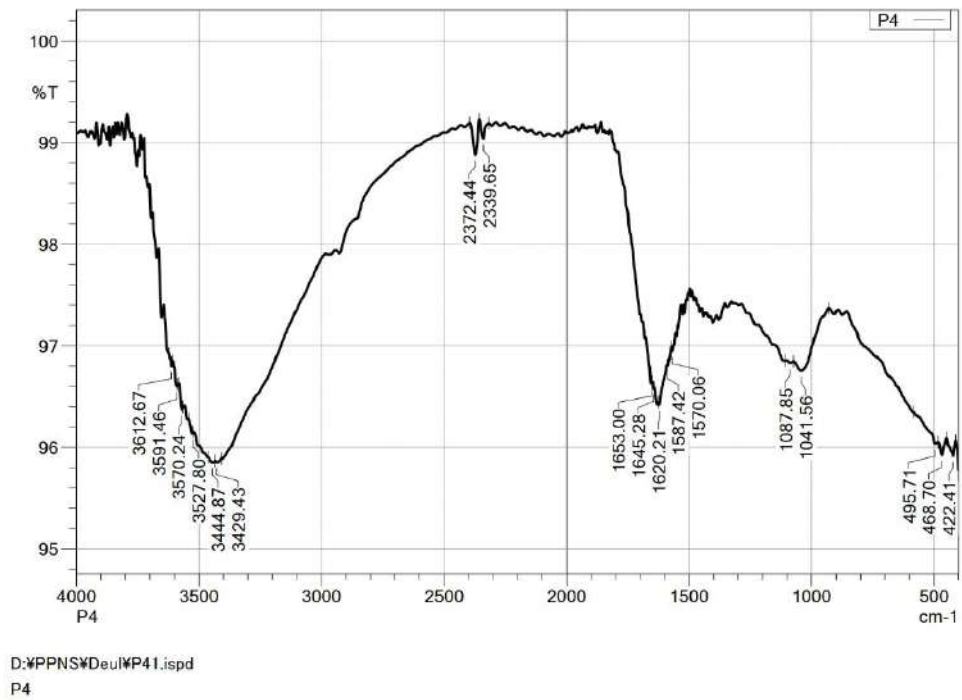
UBAYA Kampus Tenggilis, Gedung BB Lt.4
Jl. Raya Kalirungkut, Kali Rungkut, Kec.
Rungkut, Surabaya, Jawa Timur 60293



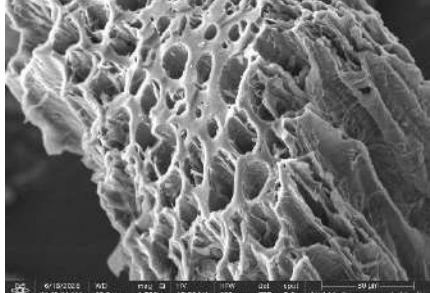
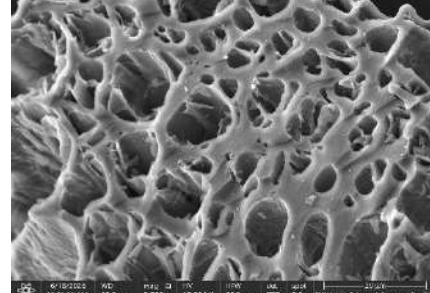
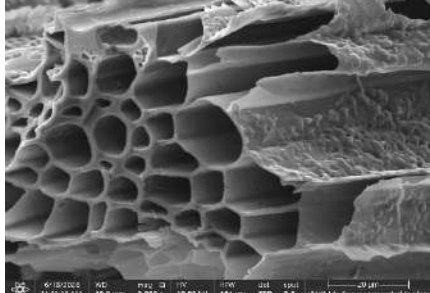
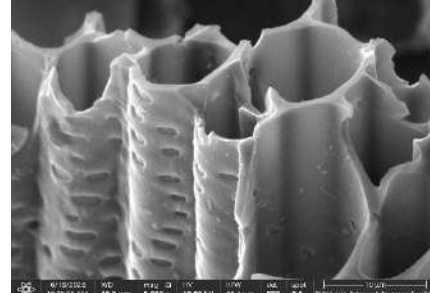
D:\PPNS\Deul\B22.ispd
B2

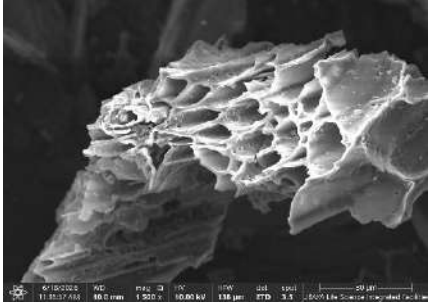
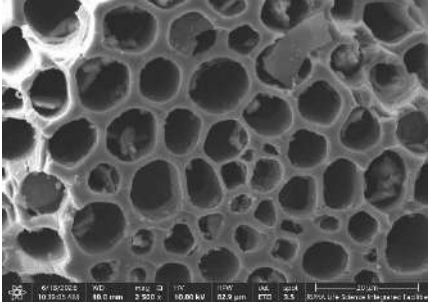
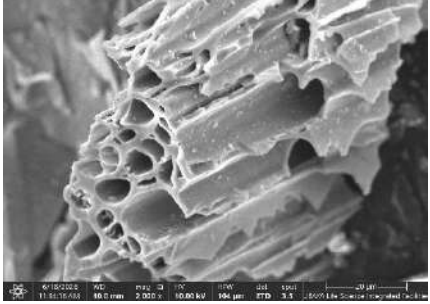
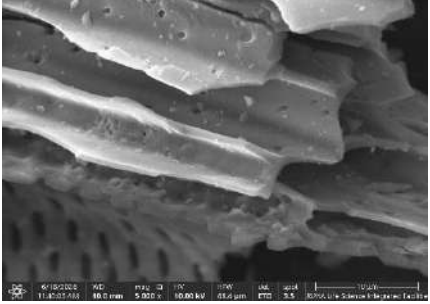
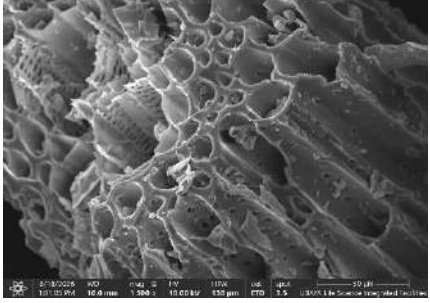
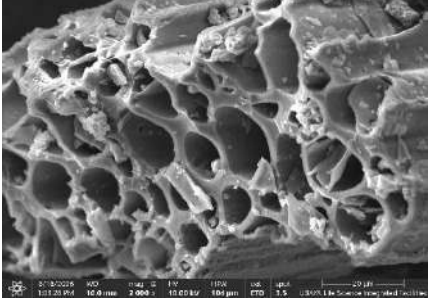
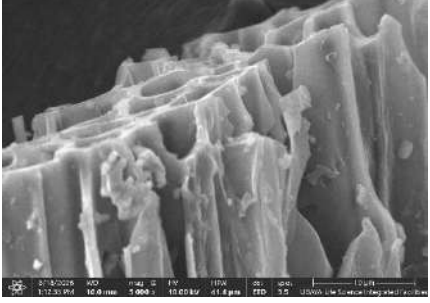


D:\PPNS\Deul\D21.ispd
D2



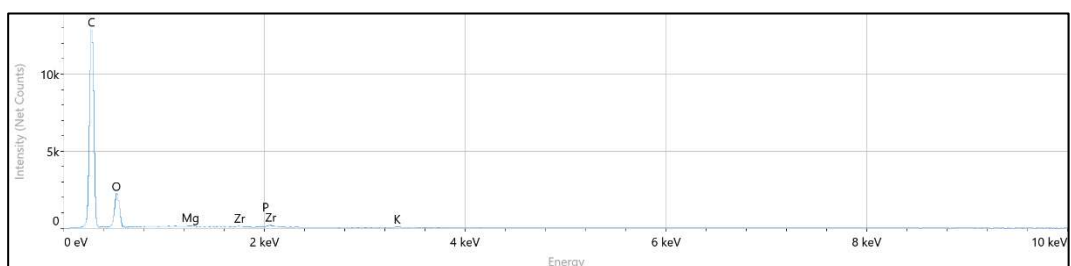
B. Data Hasil Mikrograf Pengujian SEM-EDX Pada *Biochar* dan Tanah Terremediasi

NO	Nama Sampel	
1	B2 Biochar Bagasse 500 °C	
		
	(a) X1500	(b) X2000
		
	(c) X2500	(d) X5000

NO	Nama Sampel	
2	D2 <i>Biochar Pre-Mix</i> 500 °C	
		
	(a) X1500	(b) X2000
		
	(c) X2500	(d) X5000
3	P4 Tanah Terremediasi <i>Biochar</i> D2	
		
	(a) X1500	(b) X2000
		
	(c) X2500	(d) X5000

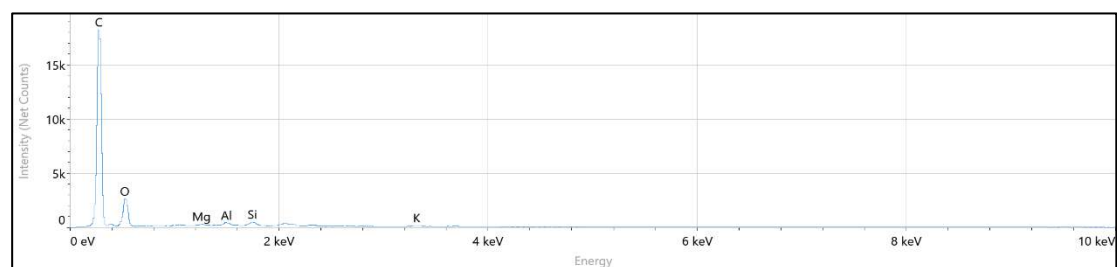
C. Data Hasil Pembacaan Unsur Pengujian SEM-EDX Pada *Biochar* dan Tanah Terremediasi

1. B2 *Biochar Bagasse* 500 °C



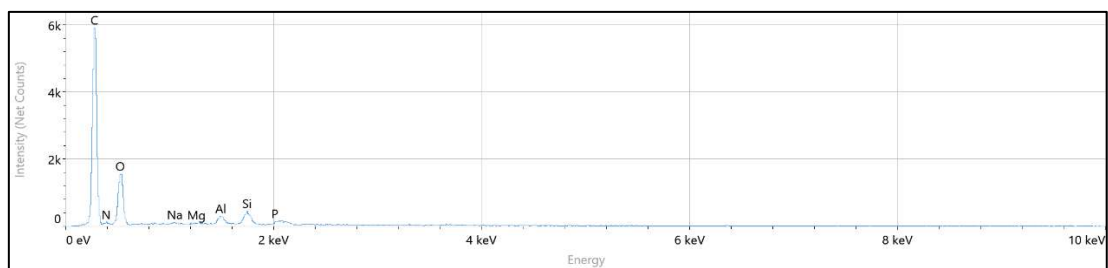
Element	Line	At. %	Wt. %	Net Counts	At. % Error	Wt. % Error
C	K	79.0	72.0	62 431	0.4	0.4
O	K	20.3	24.6	11 779	0.2	0.3
Mg	K	0.1	0.2	354	0.0	0.0
P	K	0.0	0.0	0	---	---
K	K	0.2	0.7	446	0.0	0.1
Zr	L	0.4	2.5	1 729	0.0	0.1

2. D2 *Biochar Pre-Mix* 500 °C



Element	Line	At. %	Wt. %	Net Counts	At. % Error	Wt. % Error
C	K	82.6	76.2	90 823	0.4	0.4
O	K	15.1	18.6	12 507	0.2	0.2
Mg	K	0.2	0.3	713	0.0	0.0
Al	K	0.4	0.8	1 866	0.0	0.1
Si	K	0.6	1.3	3 120	0.0	0.0
P	K	0.6	1.4	2 576	0.0	0.1
K	K	0.5	1.4	1 309	0.0	0.1

3. P4 Tanah Terremediasi *Biochar* D2



Element	Line	At. %	Wt. %	Net Counts	At. % Error	Wt. % Error
C	K	68.0	58.9	28 451	0.5	0.4
N	K	7.1	7.2	1 003	1.0	1.1
O	K	21.9	25.2	8 727	0.4	0.4
Na	K	0.2	0.3	290	0.0	0.0
Mg	K	0.1	0.2	179	0.0	0.0
Al	K	0.8	1.5	1 747	0.0	0.1
Si	K	1.3	2.7	3 054	0.0	0.1
P	K	0.0	0.0	0	---	---
Zr	L	0.6	4.0	1 981	0.0	0.2

LAMPIRAN I DOKUMENTASI PENELITIAN

Halaman sengaja dikosongkan

Pengambilan dan <i>Pre Treatment</i> Bahan Baku		
 Pengambilan bahan baku <i>sludge</i>.	 Pengambilan bahan baku <i>baggase</i> tebu.	 Proses pengeringan dan <i>sludge</i> selama 8 jam dan pengayakan 60 mesh.
 Proses pencacahan dan pengeringan <i>baggase</i> tebu selama 6 jam.	 Proses pengeringan bahan baku menggunakan oven selama 6 jam.	 Proses pengambilan tanah <i>topsoil</i>.
 Proses pengeringan dan pengayakan tanah <i>topsoil</i>.		
Proses Uji <i>Proximate</i> Bahan Baku		
 Proses penimbangan cawan petri setelah di oven.	 . Proses pengukuran kadar air bahan baku.	 Proses pengukuran kadar air bahan baku.

		
Proses pengujian <i>proximate</i> bahan baku.	Proses pengujian <i>proximate</i> bahan baku.	Proses pengujian <i>proximate</i> bahan baku.
		
Proses pengujian <i>proximate</i> bahan baku.	Proses pengujian pH dan EC.	
Proses Karakterisasi Awal dan Spiking Pb Pada Tanah		
		
Proses penimbangan tanah yang akan diuji.	Proses pengujian karakteristik awal tanah.	Proses pengujian karakteristik awal tanah.
		
Pengujian karakteristik awal tanah.	Proses penimbangan senyawa timbal ($Pb(NO_3)_2$) sebagai tahap awal dalam pembuatan larutan Pb berkonsentrasi 100 ppm.	Proses penambahan larutan timbal ($Pb(NO_3)_2$) dengan konsentrasi 100 ppm ke dalam matriks tanah.

 Proses homogenisasi larutan pb dalam tanah dilanjutkan inkubasi selama 14 hari untuk memastikan distribusi merata.		
Proses Produksi <i>Biochars</i>		
 Proses penimbangan bahan baku sebelum masuk kedalam reaktor <i>pyrolysis</i>.	 Proses pemasukan bahan baku ke dalam reaktor <i>pyrolysis</i> sebagai tahap awal sebelum perlakuan termal.	 Proses pemanasan termal selama 1 jam pada suhu yang disesuaikan dengan variasi perlakuan.
 Proses pemanasan termal selama 1 jam pada suhu yang disesuaikan dengan variasi perlakuan.		
Proses Penghitungan <i>yield</i> dan Pengujian Proximate <i>Biochar</i>		
 Proses penimbangan produk <i>biochar</i> yang digunakan sebagai dasar perhitungan <i>yield</i>.	 Proses penimbangan produk <i>biochar</i> yang digunakan sebagai dasar perhitungan <i>yield</i>.	 Proses penghalusan produk <i>biochar</i> yang dilanjutkan dengan pengayakan menggunakan ukuran 80 mesh untuk persiapan pengujian proksimat.

		
Proses penimbangan cawan petri setelah di oven.	Proses pengujian kadar air untuk produk <i>biochar</i>	Proses pengujian <i>proximate</i> produk <i>biochar</i>
		
Proses pengujian <i>proximate</i> produk <i>biochar</i>	Proses pengujian <i>proximate</i> produk <i>biochar</i>	
Proses Pengaplikasian <i>Biochar</i> Pada Tanah Tercemar Buatan (<i>artificially contaminated</i>)		
		
Proses penimbangan tanah sebelum pengaplikasian <i>biochar</i>	Proses pengaplikasian <i>biochar</i> dengan dosis 5% b/b	Inkubasi tanah tercemar buatan dengan <i>biochar</i> setelah homogenisasi selama 28 hari untuk mencapai kondisi kesetimbangan penyerapan.
Proses Pengujian Karakteristik Fisiokimia Tanah Setelah Perlakuan		
		
Proses penimbangan tanah tercemar buatan	Proses penimbangan tanah terremediasi <i>biochar</i>	Prose penimbangan tanah terremediasi untuk selanjutnya dilakukan uji <i>bulk density</i>

 Penimbangan massa air dan labu ukur untuk selanjutnya digunakan untuk uji <i>particle density</i>	 Penimbangan CaCL Anhidrat untuk membuat larutan CaCl 0,01M untuk eksrtaksi Pb terlarut di tanah	 Proses ekstraksi Pb terlarut pada tanah terremediasi
 Filtrat hasil ekstraksi selanjutnya di pindah ke dalam wadah <i>inert</i> guna menjaga kadar pb terlarut	 Pengujian kadar Pb terlarut menggunakan instrumen AAS	

Halaman ini sengaja dikoosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Deul Tirtayuda Legawa, lahir di Kabupaten Banyuwangi pada tanggal 14 Oktober 2004. Riwayat pendidikan formal penulis diantaranya SDN 1 Glagahagung, SMPN 1 Purwoharjo, dan SMAN 1 Purwoharjo. Penulis melanjutkan pendidikan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah. Selama pendidikan berlangsung, penulis pernah mengikuti Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra Tingkat Dasar.

Penulis juga mempunyai pengalaman On The Job Training di PT Heinz ABC Indonesia dan PT Mitra Prima Enviro. Pada Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah, penulis melakukan penelitian Tugas Akhir dengan judul “Studi Komparasi Karakteristik *Biochar* Tunggal dan Komposit serta Pengaruhnya Terhadap Sifat Hidrolis dan Remediasi Logam Berat (Pb) pada Tanah”. Pembaca yang ingin menyampaikan kritik, saran, maupun pertanyaan mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email deultirta1410@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan

