

**PERBAIKAN LINGKUNGAN RIZOSFER MENGGUNAKAN
AMELIORAN *BIOCHAR* BERBAHAN TANDAN KOSONG KELAPA
SAWIT DAN KAYU KARET: RESPON PENURUNAN KEMASAMAN
TANAH DAN PERTUMBUHAN BIBIT SAWIT (*Elaeis guineensis* Jacq)**

(Tesis)

Oleh

**SELDI PRAYOGA
NPM 2120011008**



**PROGRAM PENDIDIKAN STARATA 2
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PERBAIKAN LINGKUNGAN RIZOSFER MENGGUNAKAN AMELIORAN *BIOCHAR* BERBAHAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN KAYU KARET: RESPON PENURUNAN KEMASAMAN TANAH DAN PERTUMBUHAN BIBIT SAWIT (*Elaeis guineensis* Jacq)

Oleh

SELDI PRAYOGA

Penurunan kualitas lingkungan akibat intensifikasi pertanian dan akumulasi limbah organik menjadi tantangan serius dalam pengelolaan lahan pertanian berkelanjutan, khususnya pada pertanaman kelapa sawit. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas *biochar* yang berasal dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan kayu karet sebagai bahan *ameliorant* dalam memperbaiki kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan bibit kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq). *Biochar* diproduksi melalui proses pirolisis dengan metode *double drum* dan diaplikasikan media tanam bibit sawit dengan beberapa perlakuan dosis 0%, 5% dan 10%. Variabel yang diamati meliputi sifat fisik dan kimia tanah (pH dan C-karbon), pertumbuhan vegetatif tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi *pellet biochar*, khususnya yang berasal dari TKKS dan kayu karet, secara signifikan meningkatkan kualitas tanah dan pertumbuhan tanaman. Peningkatan pH tanah, ketersediaan hara, kenaikan C-karbon turut berkontribusi terhadap produktivitas bibit sawit. Dengan demikian, pemanfaatan *biochar* dari limbah organik ini tidak hanya menjadi solusi pengelolaan limbah yang ramah lingkungan, tetapi juga strategi rehabilitasi lahan yang efektif dalam sistem pertanian kelapa sawit.

Kata kunci: *biochar*, TKKS, kayu karet, dosis

ABSTRACT

RHIZOSPHERE ENVIRONMENT IMPROVEMENT USING BIOCHAR AMENDMENTS DERIVED FROM OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCHES AND RUBBER WOOD: RESPONSE TO SOIL ACIDITY REDUCTION AND GROWTH OF OIL PALM SEEDLINGS (*Elaeis guineensis* Jacq.)

By

SELDI PRAYOGA

The decline in environmental quality due to agricultural intensification and the accumulation of organic waste poses a serious challenge to sustainable land management, particularly in oil palm cultivation. This study aimed to evaluate the effectiveness of biochar derived from oil palm empty fruit bunches (EFB) and rubber wood as soil ameliorants to improve soil quality and support the growth of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings. Biochar is produced through a pyrolysis process using the double drum method. and applied to the seedling growth medium at varying application rates of 0%, 5%, and 10%. Observed variables included soil physical and chemical properties (pH and carbon content) as well as vegetative plant growth. The results showed that the application of pelletized biochar, particularly from EFB and rubber wood, significantly improved soil quality and plant growth. The increase in soil pH, nutrient availability, and carbon content contributed positively to the productivity of oil palm seedlings. Therefore, the use of biochar from organic waste not only provides an environmentally friendly waste management solution but also serves as an effective land rehabilitation strategy in oil palm farming systems.

Keywords: biochar, EFB, rubber wood, dosage

**PERBAIKAN LINGKUNGAN RIZOSFER MENGGUNAKAN
AMELIORAN *BIOCHAR* BERBAHAN TANDAN KOSONG KELAPA
SAWIT DAN KAYU KARET: RESPON PENURUNAN KEMASAMAN
TANAH DAN PERTUMBUHAN BIBIT SAWIT (*Elaeis guineensis* Jacq)**

Oleh

SELDI PRAYOGA

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER ILMU LINGKUNGAN**

Pada

**Program Studi Magister Ilmu Lingkungan
Pascasarjana Multidisiplin Universitas Lampung**



**PROGRAM PENDIDIKAN STARATA 2
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Tesis

: **PERBAIKAN LINGKUNGAN RIZOSFER
MENGUNAKAN AMELIORAN *BIOCHAR*
BERBAHAN TANDAN KOSONG KELAPA
SAWIT DAN KAYU KARET: RESPON
PENURUNAN KEMASAMAN TANAH DAN
PERTUMBUHAN BIBIT SAWIT (*Elaeis
guineensis* Jacq)**

Nama Mahasiswa

: **Seldi Prayoga**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2120011008**

Program Studi

: **Magister Ilmu Lingkungan**

Fakultas

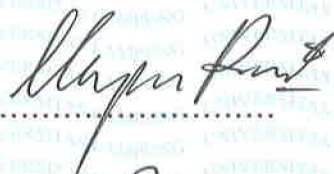
: **Pascasarjana Multidisiplin**

MENYETUJUI,

1. **Komisi Pembimbing**

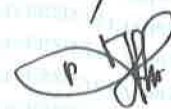
Dr. Melya Riniarti, S.P., M. Si.

NIP. 197705032002122002



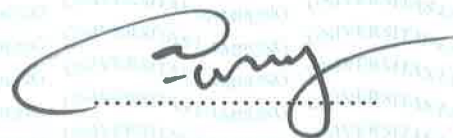
Dr. Hendra Prasetya, S. Hut., M. Sc.

NIP. 198904132022021001



Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.

NIP. 197911142009121001



2. **Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan
Universitas Lampung**



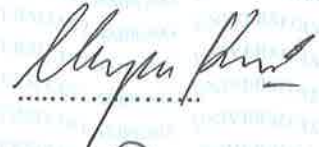
Hari Kaskoyo, S. Hut., M.P., Ph.D.

NIP. 196906011998021002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

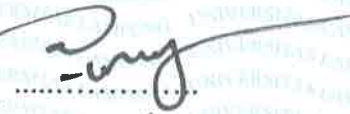
Ketua : **Dr. Melya Riniarti, S.P., M. Si.**



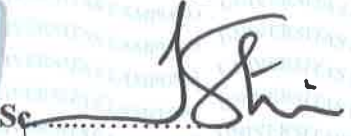
Sekretaris : **Dr. Hendra Prasetia, S. Hut., M. Sc.**



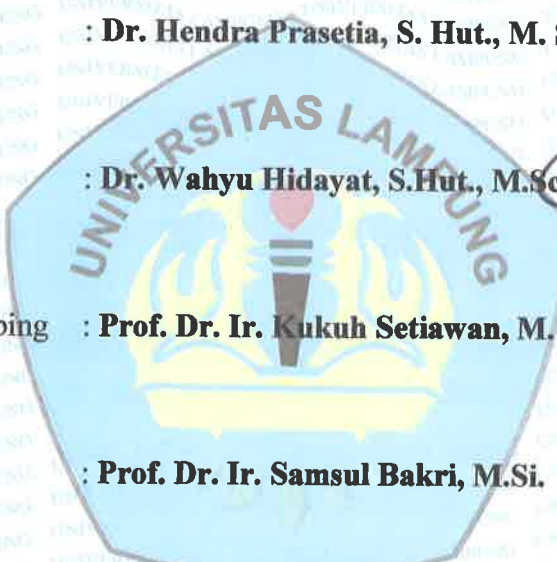
Anggota : **Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Prof. Dr. Ir. Kukuh Setiawan, M. Sc.**



Anggota : **Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si.**



2. Direktur Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : 22 Mei 2025

PERNYATAAN HASIL KARYA

Dengan Saya adalah Seldi Prayoga NPM 2120011008 menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul **“PERBAIKAN LINGKUNGAN RIZOSFER MENGGUNAKAN AMELIORAN *BIOCHAR* BERBAHAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN KAYU KARET: RESPON PENURUNAN KEMASAMAN TANAH DAN PERTUMBUHAN BIBIT SAWIT (*Elaeis guineensis* Jacq)”** adalah hasil karya saya yang dibimbing oleh Komisi Pembimbing, 1) Dr. Melya Riniarti, S.P., M. Si. 2) Dr. Hendra Prasetya, S. Hut., M. Sc. dan 3) Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan. Karya ilmiah ini berisi material yang dibuat sendiri dan hasil rujukan beberapa sumber lain (buku, jurnal, dll) yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil dari plagiat karya orang lain.
2. Hak intelektual atas karya ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, Selasa 03 Juni 2025

Yang membuat pernyataan



Seldi Prayoga

NPM. 2120011008

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Way Kanan, 17 September 1997, sebagai anak kedua dari enam bersaudara yang merupakan anak pasangan Bapak Ahmad dan Ibu Hayana. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 1 Gedung Harapan tahun 2004 -2010, SMP Negeri 10 Bandar Lampung tahun 2010-2013, dan SMK 2 Mei Bandar Lampung tahun 2013-2016. Tahun 2020 penulis menyelesaikan pendidikan tinggi di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.

Tahun 2021 peneliti tercatat sebagai mahasiswa PS Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Lampung (Unila). Jurnal peneletian ini disubmid di Jurnal Teknik Pertanian Lampung pada tanggal 19 Mei 2025.

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur yang mendalam kepada Tuhan Yang Maha Esa, tesis ini saya persembahkan kepada: **Ayah dan Ibu tercinta**, yang dengan kasih sayang, doa yang tiada henti, serta segala pengorbanan yang tidak ternilai telah menjadi cahaya dan kekuatan dalam setiap langkah hidup saya. Terima kasih atas cinta, dukungan, dan semangat yang tak pernah padam. Tanpa doa dan restu kalian, langkah ini tidak akan sampai sejauh ini.

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, para sahabat, serta seluruh umat beliau hingga akhir zaman. Semoga kita semua kelak memperoleh syafaat dan perlindungan beliau di hari kiamat. Aamiin yaa Rabbal 'alamiin.

Tesis yang berjudul **“PERBAIKAN LINGKUNGAN RIZOSFER MENGGUNAKAN AMELIORAN *BIOCHAR* BERBAHAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN KAYU KARET: RESPON PENURUNAN KEMASAMAN TANAH DAN PERTUMBUHAN BIBIT SAWIT (*Elaeis guineensis* Jacq)”** disusun sebagai salah satu persyaratan untuk meraih gelar Magister Ilmu Lingkungan di Universitas Lampung.

Tersusunnya tesis ini tentu tidak lepas dari kontribusi berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, arahan, semangat, serta bantuan dalam berbagai bentuk. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof.Dr.Ir.Lusmeilia Afriani, D.E.A.,I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Prof.Dr.Ir.Murhadi, M.Si., selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung;
3. Dr.Candra Perbawati, S.H., M.H., selaku wakil Direktur Pascasarjana Bidang Akademik, Kemahasiswaan dan Alumni Universitas Lampung;
4. Dr. Fitra Dharma,S.E., M.Si., selaku Wakil Direktur Bidang Umum Universitas Lampung;
5. Bapak Hari Kaskoyo, S. Hut., M.P., Ph.D.selaku Ketua Program Studi

Magister Ilmu Lingkungan Pascasarjana Multidisiplin Universitas Lampung.

6. Ibu Dr. Melya Riniarti, S.P., M. Si. Selaku pembimbing pertama dan sekaligus pembimbing akademik penulis yang telah bersedia membimbing serta memberi arahan dan dukungan dalam proses menyelesaikan tesis ini.
7. Dr. Hendra Prasetya, S. Hut., M. Sc. selaku pembimbing kedua yang telah bersedia membimbing serta memberi arahan dan dukungan dalam proses menyelesaikan tesis ini.
8. Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing ketiga yang telah bersedia membimbing serta memberi arahan dan dukungan dalam proses menyelesaikan tesis ini.
9. Prof. Dr. Ir. Kukuh Setiawan, M. Sc. Selaku penguji pertama penulis yang memberikan arahan dan masukan yang menyempurnakan tesis ini.
10. Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si. selaku penguji kedua penulis yang telah memberikan arahan dan masukan yang menyempurnakan tesis ini.
11. Seluruh Dosen Magister Ilmu Lingkungan Universitas Lampung atas segala ilmu yang diberikan baik dalam perkuliahan dan yang lainnya, dukungan, dan bantuan kepada penulis selama ini;
12. Mas Heri dan tim admin Magister Ilmu Lingkungan, atas arahan, bantuan, dan segala macam keperluan penulis selama menjalani perkuliahan hingga wisuda penulis;
13. Terimakasih kepada kedua orang tua yang telah selalu mendo'akan, mendukung serta memberi nasihat kepada penulis. Sehingga penulisan tesis ini dapat selesai.
14. Terimakasih kepada Dimas, Yohanes dan bang Jaya karena telah memberikan semangat dan dukungan kepada penulis.
15. Terimakasih kepada calon istri Windy Kemala Putri yang telah menemani penulis dalam berproses selama menyelesaikan pendidikannya dari strata 1 (sarjana) hingga strata 2 (magister).
16. Terimakasih kepada semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan dalam penulisan tesis ini.

Penulis sadar masih sangat banyak kekurangan dalam penulisan tesis ini untuk mendekati kata sempurna. Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih,

semoga dengan penulisan tesis ini dapat bermanfaat dan memberikan pengetahuan baru kepada orang yang membaca.

Bandar Lampung, Selasa 03 Juni 2025

Penulis,

Seldi Prayoga

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	6
1.3 Manfaat Penelitian.....	6
1.4 Kerangka Pemikiran	7
1.5 Hipotesis	8
II. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Limbah TKKS dan Limbah Kayu Karet	9
2.2 Kelapa sawit	11
2.3 <i>Biochar</i>	12
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	16
3.1 Waktu dan Tempat	16
3.2 Alat dan Bahan	16
3.3 Rancangan Percobaan.....	16
3.4 Pelaksanaan	18
3.4.1 Penyiapan dan pembuatan <i>pellet</i>	18
3.4.2 Pembuatan <i>pellet biochar</i>	18
3.4.3 Persiapan tanaman sawit	19
3.4.4 Persiapan media tumbuh dan pencampuran <i>pellet biochar</i>	19
3.4.5 Pemeliharaan	20
3.5 Pengamatan	20
3.5.1 Analisis pH tanah dan karbon tanah.....	20
3.5.2 Pertambahan tinggi (cm)	21

	Halaman
3.5.3 Jumlah pelepah.....	21
3.5.4 Lingkar Bonggol (cm).....	21
3.5.5 Berat Segar Akar (g) dan Berat Segar Daun (g)	21
3.5.6 Berat Kering Akar (g) dan Berat Kering Daun (g)	21
3.5.7 Bobot Kering Total (BKT) (gram).....	22
3.6 Analisis Data	22
3.6.1 Analisis Ragam (ANOVA)	23
3.6.2 Uji Beda Nyata Terkecil (BNT).....	24
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1 Hasil.....	25
4.2 Pembahasan	40
4.2.1 Pengaruh <i>Biochar</i> Terhadap Pertumbuhan Tanaman Sawit	40
4.2.2 Pengaruh <i>Biochar</i> Terhadap pH Tanah.....	43
4.2.3 Pengaruh <i>Biochar</i> Terhadap C-Organik.....	44
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	46
5.1 Simpulan.....	46
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram alir kerangka pemikiran.....	8
2. Skema pirolisis menggunakan <i>double drum retort</i>	19
3. Persiapan media tumbuh dan pencampuran <i>pellet biochar</i>	19
4. Ilustrasi tata letak <i>pellet biochar</i> di dalam tanah.	20
5. Grafik regresi linear antara lingkaran bonggol terhadap tinggi pada <i>pellet biochar</i> kayu karet.	31
6. Grafik regresi linear lingkaran bonggol terhadap tinggi pada <i>pellet</i> <i>biochar</i> TKKS.....	32
7. Grafik regresi linear antara jumlah pelepah terhadap lingkaran bonggol pada <i>pellet biochar</i> kayu karet.	32
8. Grafik regresi linear antara tinggi terhadap lingkaran bonggol pada <i>pellet biochar</i> TKKS.....	33
9. Grafik regresi linear antara jumlah daun terhadap tinggi pada <i>pellet biochar</i> kayu karet.	34
10. Grafik regresi linear antara jumlah daun terhadap tinggi pada <i>pellet biochar</i> TKKS.....	34
11. Grafik regresi linear antara berat kering akar terhadap berat kering pelepah pada <i>pellet biochar</i> kayu karet.	35
12. Grafik regresi linear antara berat kering akar terhadap berat kering pelepah pada <i>pellet biochar</i> TKKS.....	36
13. Grafik pertumbuhan tinggi mingguan bibit sawit menggunakan perlakuan <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet.	37
14. Pertumbuhan tinggi bibit kelapa sawit terhadap pemberian <i>pellet biochar</i> : a) <i>Pellet biochar</i> TKKS; b) <i>Pellet biochar</i> kayu karet.....	37
15. Grafik pertumbuhan lingkaran bonggol mingguan bibit sawit menggunakan perlakuan <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet.	38
16. Grafik pertumbuhan jumlah pelepah mingguan bibit sawit menggunakan perlakuan <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet.	39
17. Proses pembuatan <i>biochar</i> menggunakan metode <i>double drum</i>	65
18. <i>Pellet biochar</i>	65
19. Proses penyiapan media tanam	66
20. Proses penyiapan tanaman	66

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Tata letak percobaan dalam rancangan acak lengkap (RAL) faktorial.	17
2. Analisis ragam pertumbuhan bibit kelapa sawit.	23
3. Hasil uji analisis ragam penggunaan <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet terhadap bibit sawit.	25
4. Hasil uji BNT <i>pellet biochar</i> tkks dan kayu karet pada penambahan tinggi bibit kelapa sawit.	27
5. Hasil uji BNT perlakuan dosis terhadap penambahan tinggi bibit sawit.	27
6. Hasil uji BNT perlakuan dosis terhadap lingkaran bonggol bibit kelapa sawit.	28
7. Hasil uji BNT interaksi jenis perlakuan*dosis terhadap lingkaran bonggol.	28
8. Hasil uji BNT penggunaan <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet terhadap jumlah pelepah bibit kelapa sawit.	28
9. Hasil uji BNT perlakuan dosis terhadap berat kering pelepah.....	29
10. Hasil uji BNT <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet pada berat kering akar bibit kelapa sawit.	29
11. Hasil uji BNT pengaruh dosis terhadap berat kering akar bibit kelapa sawit.	30
12. Hasil uji BNT interaksi jenis perlakuan*dosis terhadap berat kering akar.....	30
13. Hasil uji BNT perlakuan dosis terhadap berat kering total.	30
14. Hasil analisis pH tanah <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet.	39
15. Hasil analisis C-organik tanah <i>pellet biochar</i> TKKS dan kayu karet.	40
16. Lampiran data analisis ragam.....	59
17. Lampiran uji duncan dosis terhadap variabel tinggi	60
18. Lampiran uji duncan dosis terhadap variabel jumlah pelepah	61
19. Lampiran uji duncan dosis terhadap variabel diameter.....	61
20. Lampiran uji duncan dosis terhadap variabel BKT.....	62

	Halaman
21. Lampiran uji duncan dosis terhadap variabel berat kering pelepah.....	62
22. Lampiran uji duncan dosis terhadap variabel berat kering akar	63
23. Lampiran uji duncan <i>pellet biochar</i> terhadap variabel tinggi	63
24. Lampiran uji duncan <i>pellet biochar</i> terhadap variabel berat kering akar.....	63
25. Lampiran uji duncan <i>pellet biochar</i> *dosis terhadap lingkaran bonggol	64
26. Lampiran uji duncan <i>pellet biochar</i> *dosis terhadap berat kering akar.....	64

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Volume limbah yang dihasilkan dari berbagai aktivitas, terutama sektor industri, kerap tidak dikelola dengan optimal sehingga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu jenis limbah tersebut berasal dari sektor industri pengolahan kelapa sawit. Luas areal perkebunan kelapa sawit di Indonesia terus menunjukkan tren peningkatan setiap tahunnya. Menurut data dari Badan Pusat Statistik (BPS), pada tahun 2021 luas area perkebunan kelapa sawit mencapai 14.663,60 hektar, meningkat menjadi 15.338,60 hektar di tahun 2022, dan pada tahun 2023 naik lagi menjadi 15.435,70 hektar. Pertumbuhan ini mencerminkan prospek positif industri kelapa sawit di Indonesia, yang didorong oleh tingginya permintaan global terhadap produk utama yaitu minyak sawit mentah atau *Crude Palm Oil* (CPO) (Susanto *et al.*, 2017). Namun demikian, limbah padat yang dihasilkan, seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), umumnya masih belum dimanfaatkan secara maksimal dan hanya digunakan dalam skala terbatas, misalnya dibakar, dijadikan mulsa atau digunakan sebagai pupuk dan pakan ternak di area sekitar pabrik (Kresnawaty *et al.*, 2017). Melihat kondisi ini, diperlukan upaya pengembangan teknologi yang inovatif untuk mengolah TKKS menjadi produk yang memiliki nilai ekonomis dan fungsional lebih tinggi.

Proses pengolahan kelapa sawit menghasilkan limbah dalam berbagai bentuk, yang secara umum diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama: limbah cair, limbah padat, dan limbah gas (Iryani *et al.*, 2019). Salah satu jenis limbah padat yang paling dominan volumenya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Berdasarkan estimasi, dari setiap satu ton tandan buah segar (TBS) yang diproses, sekitar 230 kilogram atau sekitar 23 persennya merupakan TKKS (Mandiri, 2012). Meskipun limbah ini tersedia dalam jumlah besar, tingkat

pemanfaatannya masih relatif rendah. Akibatnya, TKKS sering kali hanya ditumpuk dan dibiarkan membusuk di sekitar pabrik, yang dapat menyebabkan timbulnya bau menyengat serta menjadi sarang perkembangbiakan lalat, sehingga berpotensi mencemari lingkungan dan memicu penyebaran penyakit (Sopiah *et al.*, 2017). Padahal, limbah ini memiliki kandungan unsur hara yang cukup bernilai, seperti kalsium (Ca), besi (Fe), natrium (Na), kalium (K) dan fosfor (P), yang menjadikannya sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan pembenah tanah (Pratiwi dan Ardiansyah, 2019). Oleh karena itu, pemanfaatan TKKS secara lebih efisien dapat menjadi salah satu strategi ramah lingkungan yang sekaligus mendukung produktivitas lahan.

Selain limbah yang berasal dari sektor pertanian, sektor kehutanan juga turut menyumbang limbah dalam jumlah besar, salah satunya berasal dari hasil pemrosesan kayu. Berdasarkan kajian Rachma dan Malik (2011), limbah yang dihasilkan dari aktivitas penggergajian kayu terdiri atas tiga kategori utama, yakni serbuk gergaji sebanyak 12–15%, potongan kecil serta sisa ujung kayu yang mencapai sekitar 25–35% dan potongan dolok serta kayu yang mengalami cacat sebesar 5–10%. Dalam praktik budidaya tanaman karet, pohon-pohon yang sudah menurun produktivitasnya umumnya akan ditebang dan digantikan dengan pohon muda sebagai bagian dari proses *replanting* atau peremajaan kebun. Kayu dari pohon karet ini memiliki potensi ekonomi yang cukup tinggi karena dapat dimanfaatkan dalam berbagai sektor, termasuk sebagai sumber pendapatan, penciptaan lapangan kerja, serta berkontribusi dalam menjaga kelestarian lingkungan dan keanekaragaman hayati (Budi *et al.*, 2018). Namun, seiring dengan tingginya tingkat pemanfaatan kayu karet, volume limbah kayu yang dihasilkan pun meningkat secara signifikan. Sayangnya, pemanfaatan limbah ini masih sangat terbatas, bahkan sebagian besar masyarakat cenderung membakar atau membuangnya sembarangan. Praktik tersebut tidak hanya mencerminkan pemborosan sumber daya, tetapi juga berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan dan kerusakan ekosistem.

Berdasarkan penjelasan yang telah disampaikan sebelumnya, limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan limbah kayu karet menyimpan potensi signifikan sebagai material utama dalam pembuatan *pellet biochar*. Transformasi

kedua jenis limbah ini menjadi produk yang bernilai guna tinggi dapat dilakukan melalui proses karbonisasi. Teknik produksi *biochar* sendiri cukup beragam, mulai dari metode sederhana di tingkat rumah tangga yang menggunakan tungku atau kompor tradisional, hingga sistem berskala besar yang memanfaatkan reaktor pirolisis modern. Pendekatan ini tidak hanya memungkinkan pemanfaatan limbah secara lebih optimal, tetapi juga mendukung upaya pengurangan dampak negatif terhadap lingkungan melalui teknologi ramah lingkungan yang aplikatif di berbagai skala operasional. Pirolisis sendiri merupakan proses termokimia yang berfungsi mengubah biomassa menjadi *biochar* melalui pemanasan pada suhu antara 350–700°C tanpa adanya oksigen (Varma *et al.*, 2018). *Pellet biochar* TKKS dan kayu karet diaplikasikan pada tanaman kelapa sawit yang bertujuan untuk memperbaiki unsur hara pada tanah sehingga meningkatkan pertumbuhan tanaman kelapa sawit. Selain itu diharapkan pemanfaatan *pellet biochar* ini dapat mengurangi keberadaan limbah biomassa sehingga dapat memperbaiki kualitas lingkungan. Aplikasi *biochar* pada tanah lahan kering dapat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) serta kandungan fosfor (P) dalam tanah. Peningkatan nilai KTK ini terjadi karena adanya pembentukan gugus karboksilat yang terbentuk melalui proses oksidasi abiotik di permukaan partikel *biochar* (Tambunan *et al.*, 2014). Selain berfungsi sebagai agen pembenah tanah, *biochar* juga mampu meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh tanaman, yang pada akhirnya berdampak positif terhadap pertumbuhan tanaman (Tarigan dan Nelvia, 2020).

Biochar berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Apabila pengurangan emisi karbon dapat mencapai 1 gigaton per tahun selama empat dekade, maka konsentrasi gas CO₂ di atmosfer diperkirakan akan tetap stabil. Untuk menurunkan kadar karbon di atmosfer, diperlukan produksi *biochar* dalam skala besar dengan memanfaatkan limbah organik atau biomassa sebagai bahan baku. Oleh karena itu, penting bagi kita untuk memperhatikan proses produksi *biochar* dalam jumlah besar dari sisa-sisa tanaman. Saat ini, teknologi pirolisis umum digunakan dalam pembuatan *biochar*, meskipun proses ini masih menghasilkan emisi CO₂ yang dilepaskan kembali ke atmosfer. Sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan, karbonisasi

hidrotermal dinilai lebih efektif dalam menekan emisi gas (Sarwono, 2016). Dengan mengubah limbah organik (seperti tandan kosong kelapa sawit dan kayu karet) menjadi biochar, karbon yang seharusnya terlepas ke atmosfer dalam bentuk CO₂ akibat dekomposisi atau pembakaran terbuka, malah disimpan secara permanen. Selain itu, aplikasi biochar di tanah dapat menurunkan emisi N₂O dan CH₄, dua gas rumah kaca lainnya (Jeffery *et al.*, 2011). Biochar memiliki struktur aromatik yang sangat stabil, yang membuatnya tahan terhadap dekomposisi mikroba di dalam tanah. Akibatnya, karbon yang terkandung dalam biochar tidak mudah terurai menjadi CO₂, sehingga tetap terperangkap di dalam tanah selama puluhan hingga ribuan tahun (Lehmann & Joseph, 2015).

Selain itu, *biochar* memiliki lebih banyak keuntungan seperti biaya produksi yang rendah, ramah lingkungan dan bahan baku biomassa yang beragam (Wang *et al.*, 2024). Berbagai sumber biomassa dapat digunakan untuk memproduksi *biochar* (Rani *et al.*, 2023). Sebagai ilustrasi, penelitian oleh Pipiška *et al.* (2022) memanfaatkan *pellet* kayu sebagai bahan dasar dalam pembuatan *biochar*, yang merupakan praktik umum dalam produksi material karbon tersebut. Selain *pellet* kayu, beragam jenis biomassa lainnya seperti sisa-sisa hasil pertanian juga telah dimanfaatkan untuk tujuan serupa (Nabila *et al.*, 2023; Yrjälä *et al.*, 2022). Limbah sendiri dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama berdasarkan karakteristik alaminya, yaitu limbah organik dan limbah anorganik. Limbah anorganik mencakup material yang tidak dapat diuraikan secara hayati melalui proses biologis, sedangkan limbah organik terdiri dari bahan-bahan yang dapat mengalami dekomposisi secara alami melalui aktivitas mikroorganisme, baik dalam kondisi yang mengandung oksigen (aerob) maupun tanpa oksigen (anaerob) (Warlina *et al.*, 2013). Beberapa contoh limbah organik yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan lebih lanjut adalah tandan kosong kelapa sawit dan limbah kayu dari pohon karet.

Hampir seluruh pertanian di Indonesia bergantung pada pupuk kimia untuk mempercepat pertumbuhan tanaman pertanian. Kurangnya pengetahuan masyarakat tentang bahaya penggunaan pupuk kimia dalam jangka waktu yang panjang dapat merusak sifat-sifat tanah. Menurut Sutoyo (2018) dan Simarmata (2008), penggunaan pupuk kimia secara terus-menerus dalam jangka panjang

dapat memberikan dampak negatif terhadap kondisi tanah serta lingkungan sekitarnya. Penggunaan pupuk kimia dalam pertanian memang dapat meningkatkan hasil panen dalam jangka pendek. Namun, jika digunakan secara berlebihan dan terus-menerus, pupuk kimia dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan yang serius. Tanah yang rusak dan tidak sehat dapat menyebabkan rendahnya produksi tanaman, bahkan sampai pada degradasi tanah yang lebih parah seperti lahan tandus yang tidak dapat digunakan untuk produksi pertanian.

Pemanfaatan *biochar* sebagai bahan pembenah tanah memiliki potensi besar dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi esensial bagi tanaman, memperbaiki kemampuan tanah dalam menyimpan air, serta memperbesar kapasitas tanah dalam menyerap dan mempertahankan karbon. Di samping itu, penggunaan *biochar* secara berkelanjutan juga berkontribusi dalam memperlambat proses degradasi lahan dan mendorong peningkatan kualitas serta kesehatan tanah secara menyeluruh. Menurut International *Biochar* Initiative (IBI) (2015), *biochar* memberikan manfaat baik ketika diaplikasikan secara tunggal maupun dalam kombinasi dengan produk-produk lain. Basri dan Azis (2011) juga menegaskan bahwa *biochar* dapat meningkatkan kelembapan tanah, memperbaiki tingkat kesuburan, serta memiliki sifat tahan lama di dalam tanah. Sementara itu, Kong *et al.* (2014) menunjukkan bahwa *biochar* mampu memperbesar kapasitas tanah dalam mempertahankan hara dan menjaga kelembaban. Selain manfaat tersebut, *biochar* juga dapat menekan emisi gas rumah kaca (IBI, 2015; Kong *et al.*, 2014). Penelitian oleh Dume *et al.* (2016) menambahkan bahwa penggunaan *biochar* berperan dalam meningkatkan pH tanah, kandungan karbon organik, nitrogen total, fosfor, serta kapasitas tukar kation (KTK). Efektivitasnya dalam menjaga ketersediaan unsur hara serta menunjang pertumbuhan tanaman turut diperkuat oleh temuan Bonanomi *et al.* (2017).

Pengolahan limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan kayu karet menjadi *biochar* selaras dengan target tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) nomor 12, yakni mendorong pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan dan bertanggung jawab. Konversi limbah biomassa menjadi *biochar* membantu mengurangi jumlah limbah organik yang mencemari lingkungan serta mendukung

efisiensi penggunaan sumber daya secara berkelanjutan (Lehmann et al., 2020). Selain itu, praktik ini juga berkontribusi pada SDGs 13, yakni penanganan perubahan iklim, karena *biochar* berperan dalam mitigasi emisi karbon melalui peningkatan sekuestrasi karbon di dalam tanah dan penurunan emisi gas rumah kaca (Woolf et al., 2016; Ronsse et al., 2013). Penggunaan *biochar* tidak hanya meningkatkan kesuburan dan kesehatan tanah, tetapi juga menyimpan karbon dalam jangka panjang, menjadikannya solusi berbasis alam (*nature-based solution*) untuk menghadapi krisis iklim global.

Untuk menjaga keberlanjutan pertanian dan kesehatan lingkungan, penting untuk mempertimbangkan penggunaan pupuk organik, rotasi tanaman, dan praktik pertanian berkelanjutan lainnya. Dengan cara ini, keberlanjutan produksi pangan dapat terjaga tanpa merusak ekosistem, sehingga tetap tersedia bagi generasi di masa depan. Salah satu upaya untuk meningkatkan kualitas tanah adalah melalui pemanfaatan bahan pembenah tanah, seperti *biochar*. Dampak positif *biochar* terhadap lingkungan, yaitu meningkatkan kualitas tanah, pengurangan emisi gas rumah kaca, manajemen limbah organik dan potensi mengurangi polusi air. *Biochar* merupakan teknologi ramah lingkungan, berpotensi besar dalam mitigasi perubahan iklim, meningkatkan produktifitas tanah serta mengurangi limbah organik.

1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian diatas, tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis sifat kimia pada tanah kemasaman (pH dan C-Organik),
2. Menganalisis efektivitas penggunaan *pellet biochar* TKKS dan *pellet biochar* kayu karet untuk meningkatkan pertumbuhan bibit kelapa sawit,
3. Menganalisis pertumbuhan bibit sawit berdasarkan perlakuan dosis, guna mencari penggunaan dosis terbaik dari penggunaan *pellet biochar*.

1.3 Manfaat Penelitian

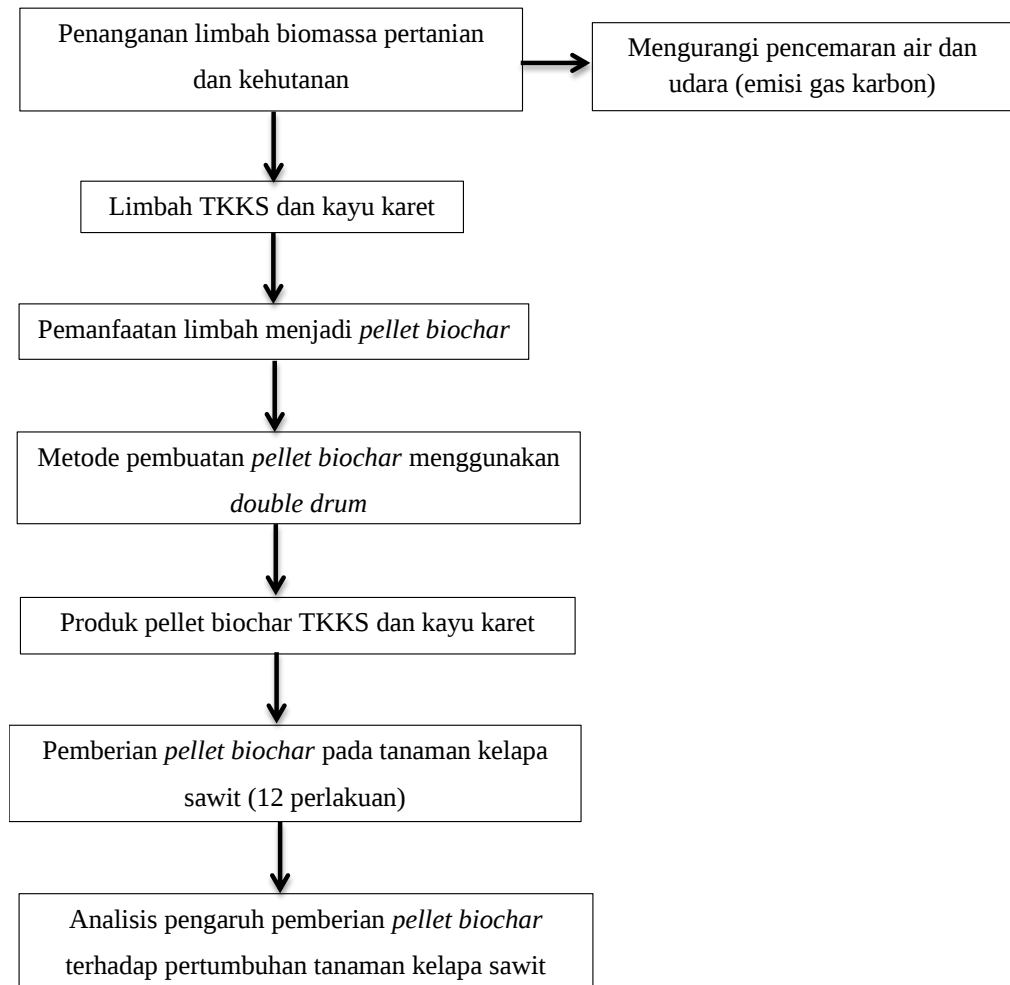
Manfaat dari penelitian ini adalah pemanfaatan limbah sebagai perbaikan kualitas lingkungan dengan pemanfaatan *biochar* berbahan dasar limbah TKKS

dan limbah kayu karet sebagai pembenah tanah. Menjadi informasi penggunaan dosis *biochar* yang tepat untuk pertumbuhan bibit kelapa sawit.

1.4 Kerangka Pemikiran

Indonesia termasuk negara dengan pemanfaatan limbah terbesar dalam sektor pertanian dan kehutanan. Oleh sebab itu terjadi penumpukan limbah dari hasil pengolahan bahan. Limbah hasil dari pengolahan harus segera ditangani dengan baik agar tidak menimbulkan masalah baru yang akan merusak lingkungan. Salah satu limbah pertanian dan kehutanan dari hasil pengolahan kelapa sawit adalah TKKS dan limbah pemotongan kayu karet. Namun sifat limbah yang tidak memungkinkan untuk langsung dimanfaatkan, maka harus ada teknologi terbarukan yaitu *biochar*.

Limbah biomassa dari hasil pertanian dan kehutanan yang tidak dikelola dengan baik banyak yang ditimbun dan dibuang ke aliran sungai yang dapat menyebabkan pencemaran air. Selain itu, terdapat pengolahan lain yaitu dengan cara dibakar sehingga menimbulkan masalah polusi, peningkatan emisi gas karbon dan pemanasan global. Hal tersebut mengakibatkan menurunnya kualitas lingkungan. Penanganan limbah biomassa salah satunya dengan *biochar*. Selain itu, *biochar* dapat memperbaiki kualitas tanah sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan dan meningkatkan ketersediaan air di dalam tanah. Limbah biomassa yang memiliki potensi untuk dijadikan *biochar* diantaranya TKKS dan kayu karet. Pembuatan *pellet biochar* menggunakan metode *double drum* dan diaplikasikan pada tanaman kelapa sawit yang kemudian dianalisis pengaruh pemberian *pellet biochar* terhadap pertumbuhan tanaman kelapa sawit. Kerangka pemikiran ini secara ringkas dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir kerangka pemikiran.

1.5 Hipotesis

Dugaan sementara dalam penelitian ini yaitu:

1. Penggunaan dosis *pellet biochar* TKSS dan kayu karet sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman sawit.
2. Pemberian dosis 10% lebih baik untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman sawit.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah TKKS dan Limbah Kayu Karet

Limbah merupakan sisa bahan yang dibuang di suatu tempat dan dapat mencemari lingkungan karena tidak memiliki nilai ekonomis (Elsaprike *et al.*, 2018). Sisa buangan dari kegiatan pertanian mencakup seluruh bagian tanaman, mulai dari bagian bawah hingga ujung atas tanaman, yang tidak dimanfaatkan setelah proses panen atau pengambilan hasil utama (Haryanto *et al.*, 2021a). Salah satu jenis limbah yang berasal dari sektor pertanian, terutama dari aktivitas pengolahan kelapa sawit, terbagi menjadi tiga kategori utama yaitu limbah cair, limbah padat, dan limbah gas (Iryani *et al.*, 2019). TKKS termasuk dalam jenis limbah padat yang muncul sebagai hasil samping dalam proses pengolahan buah sawit. Di samping TKKS, terdapat pula limbah padat lainnya seperti serat dan cangkang, sementara limbah cair umumnya berasal dari sisa-sisa minyak yang tidak terpakai selama pengolahan. Namun, pemanfaatan limbah TKKS masih belum optimal disebagian besar pabrik kelapa sawit. Hal ini menyebabkan TKKS menjadi limbah terbesar dari industri perkebunan kelapa sawit yang memiliki potensi menimbulkan berbagai masalah (Salmina, 2017).

Tandan kosong kelapa sawit mengandung beragam jenis serat penyusun, yang terdiri atas sekitar 45,95% selulosa, 16,49% hemiselulosa, serta lignin sebesar 22,84% (Wardani, 2014). Komposisi serat tersebut menjadikan TKKS sebagai bahan organik dengan potensi tinggi untuk dimanfaatkan lebih lanjut, terutama dalam pengembangan produk berbasis biomassa. TKKS berpotensi cukup besar untuk dapat dimanfaatkan. Penggunaan TKKS bisa dijadikan sebagai sumber pupuk organik karena mengandung nutrisi yang esensial bagi tanah dan tanaman. Besarnya volume limbah dari produksi kelapa sawit dapat menjadi pilihan yang menguntungkan secara ekonomi sebagai alternatif pupuk organik. Dengan memanfaatkan limbah tersebut, kebun kelapa sawit dapat mengurangi

penggunaan pupuk kimia hingga separuhnya. Meski demikian, pemanfaatan limbah yang dihasilkan oleh kebun kelapa sawit masih belum optimal (Pratama, 2022). Limbah organik TKKS memiliki komposisi kandungan nutrisi seperti N= 1,5%, P= 0,5%, K=7,3% dan Mg= 0,9% yang membuatnya memiliki potensi yang signifikan untuk digunakan sebagai pengganti pupuk dengan cara menerapkannya di sekitar batang tanaman kelapa sawit (Haryanti *et al.*, 2014).

TKKS memiliki kandungan mineral yang relatif tinggi, seperti Ca, Fe, Na, K, dan P, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku biochar untuk pembenah tanah (Pratiwi dan Ardiansyah, 2019). *Biochar* digunakan dalam sistem tanah dan tanaman sebagai salah satu bahan pembenah tanah yang efektif. Tambunan *et al.* (2014) mengemukakan bahwa penambahan *biochar* pada tanah kering yang mengalami degradasi efektif dalam memperbaiki dan meningkatkan kesuburan tanah melalui peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) serta kandungan fosfor (P). Peningkatan KTK ini terjadi karena terbentuknya gugus karboksilat yang muncul dari proses oksidasi abiotik pada permukaan partikel *biochar*, yang menjadi faktor utama dalam peningkatan kapasitas tukar kation tanah (Tambunan *et al.*, 2014). Selain berperan sebagai bahan pembenah tanah, *biochar* juga mampu meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman, sehingga mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman secara optimal (Tarigan dan Nelvia, 2020).

Menurut data dari Badan Pusat Statistik (2019), terjadi peningkatan luas lahan tanaman karet di Indonesia sebesar 10% setiap tahunnya selama periode 2017 hingga 2018. Pada tahun 2019, total area perkebunan karet di Indonesia tercatat mencapai 3.683,50 hektar, sementara di Provinsi Lampung luasnya mencapai 172,50 hektar. Perkebunan tersebut diperkirakan menghasilkan kayu karet sekitar 37.368 meter kubik per tahun serta memproduksi lateks sebanyak 3.524.131 ton per hektar. Dengan demikian, volume limbah yang dihasilkan dari aktivitas perkebunan karet ini tentu sangat signifikan.

Tanaman karet memiliki masa umur ekonomis sekitar 25 hingga 30 tahun dan berpotensi menghasilkan kayu pada akhir periode sadap, yang merupakan biomassa kaya lignoselulosa (Rubiyanti *et al.*, 2019). Menurut Matangaran (2012), proses pemanenan kayu karet menghasilkan limbah berupa ranting, daun,

akar, serta kayu yang tidak memenuhi standar komersial. Selain limbah dari aktivitas pemanenan, industri penggergajian kayu karet juga memproduksi limbah seperti potongan dan sebetan kayu (Sutrisno, 2013). Perkebunan karet memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku biochar. Pada tahap peremajaan, batang karet umumnya dimanfaatkan untuk pembuatan furnitur, sementara ranting dan tunggul kurang dimanfaatkan secara optimal (Saputra dan Ardika, 2012). Secara umum, masyarakat lebih cenderung menggunakan kayu karet tua sebagai bahan bakar atau dasar arang daripada sebagai bahan baku industri.

2.2 Kelapa sawit

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) merupakan tanaman tropis yang asalnya dari wilayah Afrika Barat. Namun, tanaman ini juga mampu tumbuh dengan baik di berbagai daerah di luar habitat aslinya, termasuk di Indonesia. Kelapa sawit memiliki peran strategis dalam mendukung pembangunan nasional (Duryat *et al.*, 2013; Haryanto *et al.*, 2021b). Secara taksonomi, klasifikasi tanaman kelapa sawit dapat dijelaskan melalui sistematika berikut:

Kingdom : Plantae
 Sub kingdom : Viridiplantae
 Divisi : Tracheophytina
 Kelas : Magnoliopsida
 Ordo : Arecales
 Genus : *Elaeis*
 Spesies : *Elaeis guineensis* Jacq.

Secara umum, masa produktif tanaman kelapa sawit berlangsung sekitar 20 hingga 25 tahun, dengan hasil buah berkualitas yang mampu menghasilkan minyak kelapa sawit sekitar 22%. Tanaman ini melewati beberapa tahap umur, dimulai dengan fase awal selama tiga tahun pertama yang dikenal sebagai kelapa sawit muda. Selanjutnya, pada rentang usia tujuh hingga sepuluh tahun, tanaman memasuki masa matang di mana mulai menghasilkan tandan buah segar (TBS). Pada periode usia sebelas hingga dua puluh tahun, produksi tanaman biasanya mulai menunjukkan penurunan (Rahayu *et al.*, 2016).

Tanaman kelapa sawit menunjukkan pertumbuhan yang paling baik pada ketinggian 0 sampai 500 meter di atas permukaan laut, dengan curah hujan

tahunan berkisar antara 2.000 hingga 2.500 mm. Suhu lingkungan yang ideal untuk mendukung pertumbuhan tanaman ini berada di kisaran 29 hingga 30°C, dengan kebutuhan intensitas cahaya sekitar 5 sampai 7 jam per hari serta kelembapan relatif yang mencapai 80 sampai 90%. Selain faktor iklim tersebut, kelapa sawit juga membutuhkan jenis tanah yang gembur, subur, permukaan lahan yang datar, sistem drainase yang baik, serta tingkat keasaman tanah (pH) optimal di rentang 5,0 sampai 5,5 (Arsyad, 2012).

2.3 *Biochar*

Biochar merupakan bahan karbon hasil dari pirolisis biomassa dalam kondisi minim oksigen, yang telah banyak diteliti sebagai solusi ramah lingkungan untuk perbaikan kualitas tanah dan mitigasi perubahan iklim (Evizal dan Prasmatiwi, 2023). Pembuatan *biochar* memiliki peran penting dalam pemanfaatan biomassa yang melimpah di alam. Selain itu, *biochar* layak diproduksi karena memiliki tingkat oksidasi yang lebih lambat dibandingkan kompos. Hal ini disebabkan oleh perbedaan aktivitas mikroorganisme serta struktur karbon *biochar* yang menyerupai karakteristik karbon anorganik (Hidayat, 2018).

Biochar mendapat perhatian luas sebagai teknologi mitigasi emisi karbon karena kemampuannya menyimpan karbon dalam jangka panjang di dalam tanah (Sugiarto *et al.*, 2024). Soedradjad dan Soeparjono (2022) menyatakan bahwa aplikasi *biochar* dapat meningkatkan simpanan karbon organik tanah (SOC) secara signifikan dan memberikan kontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca seperti N₂O dan CH₄, meskipun dampaknya sangat tergantung pada karakteristik tanah dan *biochar* yang digunakan. Selain itu, Mautuka *et al.*, (2022), menekankan bahwa *biochar* berperan dalam memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, seperti meningkatkan kapasitas tukar kation (CEC), retensi udara, dan stabilitas agregat tanah. Hal ini menjadikan *biochar* efektif dalam mengurangi erosi dan meningkatkan kapasitas tukar kation (CEC) serta simpanan karbon organik tanah (SOC).

Biochar juga berdampak positif terhadap komunitas mikroba tanah (Suharyatun *et al.*, 2021). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *biochar* dapat

meningkatkan biomassa mikroba karbon (MBC) serta mendukung diversitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara. Namun, respons biologi ini bersifat kontekstual dan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis tanah, kondisi iklim, serta kandungan nutrisi dalam *biochar* itu sendiri (Evizal dan Prasmatiwi, 2023). Aplikasi *biochar* dalam dosis tinggi pada tanah tertentu seperti tanah liat bisa berdampak pada berkurangnya ketersediaan udara, sedangkan pada tanah berpasir dapat meningkatkan emisi partikel halus dan kehilangan unsur hara (Wahyuni *et al.*, 2023). Oleh karena itu, perlu adanya pendekatan berbasis lokasi dan pengujian spesifik sebelum penerapan *biochar* dalam skala besar. Secara keseluruhan, *biochar* menawarkan potensi besar dalam pemulihan lahan terdegradasi, penyimpanan karbon, dan pengurangan emisi, namun penggunaannya harus disesuaikan dengan kondisi ekosistem setempat agar manfaatnya maksimal dan menghindari risiko negative (Setiawan *et al.*, 2024)

Bahan dasar untuk pembuatan *biochar* dapat berasal dari berbagai limbah biomassa, seperti serpihan kayu, tempurung kelapa, tandan kosong kelapa sawit, tongkol jagung, sekam padi, kulit kacang-kacangan, kulit kayu, serta serbuk gergaji. Ketika limbah tersebut mengalami pembakaran yang tidak sempurna, akan terbentuk tiga produk utama, yakni gas metana dan hidrogen yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar, *bio-oil* yang bersifat terbarukan, serta *biochar* itu sendiri. Proses pembentukan *biochar* berlangsung melalui pirolisis. Pada skala kecil, sistem pirolisis umumnya digunakan di lapangan atau industri kecil dengan kapasitas produksi antara 50 sampai 1.000 kilogram per hari. Sedangkan pada tingkat lokal hingga regional, fasilitas pirolisis milik perusahaan besar mampu mengolah biomassa dengan kapasitas mencapai 4.000 kilogram per jam (Gani, 2010).

Biochar telah dikenal sejak zaman dahulu, khususnya oleh masyarakat asli Amazon yang mengaplikasikan *biochar* atau arang hayati ke dalam tanah. Penelitian menunjukkan bahwa setelah rentang waktu 100 hingga 1000 tahun, tanah yang mengandung *biochar* memiliki sifat fisik dan kimia yang lebih unggul dibandingkan tanah di sekitarnya (Steiner *et al.*, 2007). *Biochar* merupakan bahan padat kaya karbon yang terbentuk melalui proses pembakaran biomassa atau bahan organik secara termal dengan sedikit atau tanpa oksigen, dikenal sebagai

pirolisis, pada rentang suhu 250–700°C (Ridhuan *et al.*, 2019). Pirolisis adalah proses pemecahan bahan organik oleh panas tanpa kehadiran oksigen, yang diawali dengan pembakaran dan gasifikasi, kemudian diikuti oleh oksidasi total atau parsial dari produk hasil proses tersebut (Nurkholifah *et al.*, 2020). Berbeda dengan bahan organik biasa, *biochar* memiliki struktur cincin karbon aromatik yang membuatnya lebih stabil dan tahan lama saat berada di dalam tanah (Maguire dan Aglevor, 2010). *Biochar*, yang juga dikenal dengan istilah *biocharcoal*, merupakan produk biomassa dengan kandungan karbon tinggi.

Pemanfaatan *biochar* sebagai agen perbaikan tanah telah dikenal sejak ribuan tahun silam, khususnya di wilayah lembah Amazon, Amerika Selatan (Glaser *et al.*, 2002). Pada era 1960-an, peneliti tanah asal Belanda, Wim Sombroek, menemukan jenis tanah unik di lembah Amazon, Brasil, yang mengandung materi organik hitam dalam jumlah besar dan kaya akan unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), serta elemen lainnya. Tanah tersebut dikenal dengan sebutan Terra Preta atau tanah hitam (Chen *et al.*, 2019). *Biochar* memiliki stabilitas kimia yang tinggi sehingga efektif digunakan sebagai bahan pembenah untuk lahan kering dan dapat menyimpan karbon di dalam tanah dalam jangka waktu ratusan hingga ribuan tahun ketika dicampurkan ke dalamnya (Asmara *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2020). Saat ini, pemanfaatan *biochar* sebagai alternatif sumber bahan organik dalam pengelolaan tanah bertujuan untuk memperbaiki dan meningkatkan kesuburan pada tanah yang terdegradasi atau lahan pertanian yang kritis semakin berkembang pesat dan menjadi fokus utama bagi para ahli tanah serta lingkungan (Tambunan *et al.*, 2014).

Pengaruh *biochar* terhadap hasil tanaman sangat dipengaruhi oleh dosis aplikasi serta tipe tanah yang digunakan. Secara umum, *biochar* memberikan dampak positif terhadap produktivitas tanaman, terutama ketika diaplikasikan pada tanah dengan tingkat kesuburan rendah hingga sedang atau tanah yang mengalami degradasi, dibandingkan dengan tanah yang sudah subur atau dalam kondisi sehat. Lehmann *et al.* (1999) melaporkan bahwa pemberian *biochar* pada lahan dengan dosis 68 ton/ha dan 135 ton/ha meningkatkan biomassa padi dan kacang masing-masing sebesar 17% dan 43%. Efektivitas *biochar* terhadap hasil panen tidak hanya bergantung pada sifat fisik dan fungsi *biochar* itu sendiri, tetapi

juga sangat dipengaruhi oleh kondisi spesifik tanah serta teknik aplikasi yang digunakan. Oleh karena itu, pemanfaatan *biochar* secara optimal dalam pengelolaan lahan pertanian hanya dapat tercapai melalui penyesuaian dengan kondisi setempat dan pemahaman terhadap faktor pembatas tanah (Chen *et al.*, 2019).

Biochar terbentuk dari proses pembakaran biomassa yang tidak sempurna, sehingga masih mengandung unsur hara yang berguna untuk meningkatkan kesuburan tanah. Jika proses pembakaran berlangsung secara sempurna, hasilnya akan berupa abu yang melepaskan karbon ke atmosfer (Wibowo *et al.*, 2020). Kualitas dan karakteristik *biochar* sangat dipengaruhi oleh teknik pembuatan, jenis bahan baku yang digunakan, serta proses penanganan setelah produksi. Sifat adsorpsi dan luas permukaan *biochar* biasanya ditentukan oleh suhu saat pirolisis berlangsung, sementara kandungan nutrisi dalam *biochar* sangat bergantung pada jenis bahan baku asalnya (Gaskin *et al.*, 2008).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada periode Agustus sampai November di Rumah Kaca dan Laboratorium Silvikultur serta Perlindungan Hutan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang dipakai dalam penelitian ini terdiri dari *double drum*, *polybag* berukuran 30 x 20 cm, kaliper, timbangan analitik, penggaris, *cutter*, *oven*, laptop, kamera, serta perlengkapan tulis. Sedangkan bahan yang digunakan mencakup bibit kelapa sawit berumur 7 bulan, *pellet biochar* yang berasal dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dan kayu karet.

3.3 Rancangan Percobaan

Metode yang diterapkan dalam penelitian ini adalah eksperimen skala laboratorium. Desain percobaan yang digunakan berupa rancangan acak lengkap (RAL) faktorial dengan dua jenis *pellet biochar* dan tiga tingkat perlakuan berbeda, masing-masing diulang sebanyak sembilan kali, sehingga total percobaan berjumlah 54 satuan. Perlakuan yang diberikan meliputi: (A) *pellet biochar* dari TKKS hasil pirolisis, (B) *pellet biochar* dari kayu karet hasil pirolisis, serta tingkat penggunaan *biochar* yaitu (I) tanpa *biochar* (0%), (II) *biochar* 5%, dan (III) *biochar* 10%. Tata letak rancangan acak lengkap faktorial dengan menggunakan bibit kelapa sawit, dua jenis bahan, tiga perlakuan, dan sembilan ulangan pada tiap perlakuan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tata letak percobaan dalam rancangan acak lengkap (RAL) faktorial.

CII1	AI1	CII4
DIII1	BI4	DIII4
CII8	AI2	CII2
DIII2	BI8	DIII8
CII6	AI6	CII9
DIII6	BI9	DIII9
CII7	AI7	CII5
DIII7	BI5	DIII5
CII3	AI3	CII1
DIII3	BI1	DIII1
CII4	AI4	CII7
DIII4	BI2	DIII7
CII8	AI8	CII6
DIII8	BI6	DIII6
CII9	AI9	CII7
DIII9	BI7	DIII7
CII5	AI5	CII3
DIII5	BI3	DIII3

Keterangan:

A: Kontrol (*pellet* sawit)

B: Kontrol (*pellet* karet)

C: *Pellet* sawit pirolisis

D: *Pellet* karet pirolisis

I: 0 gram

II: 5 gram

III: 10 gram

3.4 Pelaksanaan

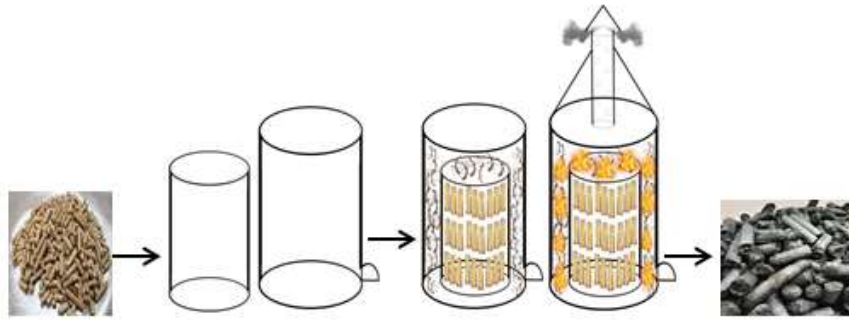
Tahapan pelaksanaan penelitian antara lain.

3.4.1 Penyiapan dan pembuatan *pellet*

Pembuatan *pellet* kayu menggunakan limbah dari pemotongan kayu karet, langkah. Selanjutnya pemotongan kayu menjadi serpihan kecil menggunakan alat pemotong. Menggunakan palu pabrik untuk mengecilkan ukuran serpihan kayu karet menjadi serbuk. Selanjutnya mengeringkan serbuk gergaji, lalu gunakan alat *pelletizer* untuk memproses bahan baku menjadi *pellet*. Selanjutnya pembuatan *pellet* TKKS, langkah pertama penyincangan TKKS untuk memudahkan penyeratan, menggunakan alat penghancur untuk mengurai TKKS, setelah menjadi serat lakukan pencucian untuk membersihkan debu, pasir dan jelaga. Hasil akhir pencucian adalah serat TKKS bersih yang siap untuk dikeringkan dengan panas matahari, setelah itu untuk memproses bahan menjadi *pellet* menggunakan *pelletizer*.

3.4.2 Pembuatan *pellet biochar*

Pembuatan *pellet biochar* dari limbah TKKS dan kayu karet dilakukan dengan metode *double drum*. Bahan baku *pellet* TKKS dan kayu karet dimasukan ke dalam drum kecil, lalu tutup drum tersebut dengan rapat. Setelah itu siapkan kayu untuk bahan bakar. Masukkan drum kecil yang berisi *pellet* ke dalam drum besar, lalu masukan kayu ke dalam sela-sela drum. Lalu bakar kayu yang sudah dimasukkan di dalam drum, tutup drum besar dengan rapat. Pastikan api tidak akan mati sebelum menutup drum. Proses pirolisis membutuhkan waktu 8 sampai 12 jam. *Retort drum* yang telah terisi penuh dengan bahan bakar kemudian ditutup secara rapat setelah pembakaran sudah sempurna. Untuk proses pirolisis dengan suhu minimum 500°C (Salim *et al.*, 2019). Disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema pirolisis menggunakan *double drum retort*

3.4.3 Persiapan tanaman sawit

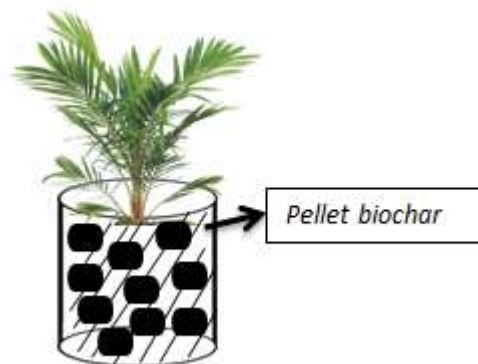
Tanaman yang dijadikan objek dalam penelitian ini adalah bibit kelapa sawit. Semua bibit yang digunakan memiliki jenis dan umur yang seragam, yaitu berumur 7 bulan dengan jenis sawit *tenera*, hasil persilangan antara kelapa sawit *dura* dan *pisifera*.

3.4.4 Persiapan media tumbuh dan pencampuran *pellet biochar*

Persiapan media tumbuh lapisan tanah teratas (*top soil*) pada 5-10 dari permukaan tanah. Diambil dari lahan perkebunan milik masyarakat, berlokasi di Pinang Jaya. Sebelum tanah dimasukkan ke dalam *polybag*, tanah terlebih dahulu dijemur guna proses sterilisasi agar terbebas dari jamur. Media tanam berupa tanah dengan berat 4 kg kemudian diaduk dengan *pellet biochar*, kemudian masukan ke dalam *polybag* berukuran 20 x 30 cm. *Pellet biochar* yang digunakan terdiri dari tiga dosis berbeda, yaitu 0%, 5%, dan 10%, (0 kg, 0,2 kg dan 0,4 kg). dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Persiapan media tumbuh dan pencampuran *pellet biochar*.



Gambar 4. Ilustrasi tata letak *pellet biochar* di dalam tanah.

3.4.5 Pemeliharaan

Pemeliharaan bibit kelapa sawit dilakukan untuk menciptakan kondisi tumbuh yang optimal. Aktivitas yang dijalankan meliputi penyiraman, pengendalian gulma, dan pengelolaan hama. Penyiraman dilakukan dua kali sehari, yaitu pada pagi dan sore hari. Pengendalian gulma dilakukan setiap minggu dengan membersihkan media tanam dari tumbuhan yang tidak diinginkan yang tumbuh bersamaan dengan bibit. Sementara itu, pengendalian hama dilakukan setiap kali ditemukan selama proses penyiraman dengan cara mengambil atau menghilangkan hama dari media tanam.

3.5 Pengamatan

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer, yang diperoleh melalui pengamatan langsung terhadap objek penelitian. Pengamatan dilakukan dengan memantau perubahan pertumbuhan bibit setelah diberikan *pellet biochar* selama jangka waktu 3 bulan. Parameter perubahan yang diamati meliputi:

3.5.1 Analisis pH tanah dan karbon tanah

Analisis tanah dilakukan dengan cara mengambil sampel secara acak dari setiap *polybag* hingga diperoleh jumlah tanah yang cukup untuk pengujian. Selanjutnya, sampel tanah tersebut dibawa ke laboratorium untuk dianalisis. Pemeriksaan tanah bertujuan untuk mengukur nilai pH serta kandungan karbon yang terdapat di dalam tanah.

3.5.2 Pertambahan tinggi (cm)

Pengukuran tinggi bibit dilakukan dengan mengukur jarak dari permukaan tanah atau patok standar setinggi 2 cm hingga ujung daun tertinggi menggunakan mistar. Proses pengukuran ini dilakukan secara berkala setiap dua minggu sekali, dimulai pada minggu ke-4 hingga minggu ke-16 pasca penanaman.

3.5.3 Jumlah pelepah

Jumlah pelepah yang dihitung meliputi pelepah yang telah benar-benar terbuka dengan kriteria panjang minimal 5–10 cm dan lebar minimal 3–5 cm. Penghitungan pelepah dilakukan secara manual. Sementara itu, pengukuran variabel tinggi tanaman dilakukan mulai minggu ke-4 hingga minggu ke-16 setelah penanaman dengan frekuensi pengukuran setiap dua minggu sekali.

3.5.4 Lingkar Bonggol (cm)

Pengukuran lingkar bonggol dilakukan dengan menggunakan pita ukur pada titik sekitar 1 cm di atas permukaan tanah. Cara pengukurannya yaitu dengan mengukur dua sisi batang yang berlawanan, kemudian hasil pengukuran tersebut dijumlahkan dan dihitung rata-ratanya. Lingkar bonggol dicatat mulai usia tanaman 4 minggu hingga 12 minggu setelah penanaman, dengan interval pengukuran setiap dua minggu sekali.

3.5.5 Berat Segar Akar (g) dan Berat Segar Daun (g)

Setelah memisahkan bagian tanaman (batang dan daun) dari bagian bawah (akar), dilakukan penimbangan berat segar masing-masing bagian tanaman. Hasil penimbangan dicatat sesuai dengan sampel, kemudian setiap sampel dimasukkan ke dalam amplop yang telah dilubangi pada bagian dinding untuk memungkinkan keluarnya air yang berasal dari jaringan tanaman. Proses penimbangan menggunakan timbangan digital atau analitik dan pengukuran ini dilakukan pada akhir penelitian.

3.5.6 Berat Kering Akar (g) dan Berat Kering Daun (g)

Setelah penimbangan berat segar pada bagian batang, sampel kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 80°C sampai berat kering tanur. Selanjutnya, sampel dikeluarkan dan ditempatkan dalam desikator selama 30

menit sebelum ditimbang. Sampel kemudian kembali dipanaskan dalam *oven* pada suhu 80°C selama 12 jam, kemudian lagi-lagi diletakkan dalam desikator selama 30 menit untuk penimbangan ulang. Jika berat pada penimbangan pertama dan kedua tidak menunjukkan perbedaan, maka proses pengeringan dianggap selesai. Namun, jika berat pada penimbangan kedua lebih rendah, pengeringan perlu dilanjutkan selama 1 jam lagi pada suhu yang sama sampai berat mencapai kestabilan (Dartius, 2011).

3.5.7 Bobot Kering Total (BKT) (gram)

Pengukuran bobot kering bibit dilakukan pada akhir periode pengamatan. Bobot kering ini digunakan untuk menentukan biomassa tanaman. Biomassa kering total (BKT) dihitung dengan menjumlahkan bobot kering dari bagian tajuk dan akar tanaman. Formula perhitungan BKT mengacu pada Dartius (2011).

$$\text{Bobot Kering Total} = \text{Bobot Kering Tajuk} + \text{Bobot Kering Akar}$$

3.6 Analisis Data

Data hasil praktikum ini dianalisis menggunakan metode Analisis Varians (ANOVA) yang kemudian dilanjutkan dengan pengujian homogenitas data. Setelah itu, dilakukan uji Beda Nyata Terkecil (BNT) dengan tingkat signifikansi 95%. Proses pengolahan data menggunakan perangkat lunak IBM SPSS versi 21 serta *Microsoft Excel* 2019. Model linier untuk Rancangan Acak Lengkap (RAL) Faktorial dirumuskan sebagai berikut:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Keterangan:

Y_{ijk} = nilai pengamatan pada unit percobaan ke-k yang menerima kombinasi perlakuan tingkat ke-i dari faktor A dan tingkat ke-j dari faktor B

μ = rata-rata populasi

α_i = efek dari tingkat ke-i pada faktor A

β_j = efek dari tingkat ke-j pada faktor B

$(\alpha\beta)_{ij}$ = interaksi antara tingkat ke-i dari faktor A dan tingkat ke-j dari faktor B

ϵ_{ijk} = efek acak pada unit percobaan ke-k dengan kombinasi perlakuan ij, dimana $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.

3.6.1 Analisis Ragam (ANOVA)

Analisis data dalam penelitian ini menggunakan metode analisis ragam (ANOVA) dengan Uji-F pada tingkat signifikansi 0,01. Tujuan ANOVA adalah untuk menguji hipotesis mengenai pengaruh perlakuan terhadap variasi data hasil percobaan serta menentukan apakah terdapat efek signifikan dari perlakuan pada variasi data penelitian. Hasil dari analisis ANOVA ini disajikan pada Tabel 2. berikut.

Tabel 2. Analisis ragam pertumbuhan bibit kelapa sawit.

SK	Db	JK	KT	F-hitung	F-tabel
Perlakuan	ab-1	JKP	KTP	KTP/KTG	$F_{(a, db-P, db-g)}$
A	a-1	JK(A)	KT(A)	KT(A)/KTG	$F_{(a, db-A, db-G)}$
B	b-1	JK(B)	KT(B)	KT(B)/KTG	$F_{(a, db-B, db-G)}$
AB	(a-1) (b-1)	JK(AB)	KT(AB)	KT(AB)/KTG	$F_{(a, db-AB, db-G)}$
Galat	ab (r-1)	JK(G)	KTG		
Total	abr-1	JKT			

Keterangan :

SK : Sumber Keragaman

db : derajat bebas ; P : Perlakuan ; G : Galat

JK : Jumlah Kuadrat ; P : Perlakuan ; G : Galat ; T : Total

KT : Kuadrat Tengah

a : jumlah perlakuan yang digunakan dalam penelitian

b : jumlah ulangan yang digunakan dalam penelitian

Apabila nilai Fhitung lebih besar dari Ftabel, maka perlakuan yang diberikan berpengaruh signifikan, sehingga dilanjutkan dengan analisis perbandingan rata-rata menggunakan Uji Beda Nyata Terkecil (BNT) pada tingkat signifikansi 1%.

Namun, jika Fhitung lebih kecil dari Ftabel, berarti perlakuan tidak memberikan pengaruh signifikan, sehingga uji lanjutan tidak diperlukan.

3.6.2 Uji Beda Nyata Terkecil (BNT)

Uji lanjutan yang diterapkan adalah Uji Beda Nyata Terkecil (BNT), yang bertujuan untuk menentukan kombinasi amelioran terbaik dalam menunjang pertumbuhan bibit kelapa sawit. Seluruh perhitungan dilakukan pada tingkat signifikansi 1%. Rumus yang digunakan adalah:

$$\text{BNT} : t_{\alpha} \sqrt{S_d}$$

$$S_d : \sqrt{\frac{2 \text{ KNT}}{r}}$$

Keterangan :

t_{α} : Nilai baku *student* pada taraf α

S_d : Standar deviasi

KNT : Kuadrat Nilai Tengah

r : Replikasi

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai pemanfaatan *pellet biochar* berbahan dasar limbah TKKS dan limbah kayu karet sebagai *ameliorant* pada pertanaman kelapa sawit, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Pemberian *pellet biochar* berpengaruh dalam menurunkan sifat kemasaman tanah serta meningkatkan kadar C-Organik pada tanah. Seiring pertambahan dosis *pellet biochar* (0%, 5% dan 10%) terdapat perbaikan pH dan C-Organik pada tanah.
2. Pemberian *pellet biochar* yang berasal dari TKKS dan kayu karet menunjukkan pengaruh signifikan terhadap berbagai variabel pertumbuhan bibit kelapa sawit, termasuk tinggi, jumlah pelepah, lingkaran bonggol, berat kering akar, berat kering pelepah, serta bobot kering total. Perlakuan dengan *pellet biochar* secara jelas mampu meningkatkan perkembangan vegetatif tanaman secara signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol yang tidak diberi *pellet biochar*.
3. Dosis pemberian *pellet biochar* sebesar 10% merupakan perlakuan yang paling efektif dalam meningkatkan pertumbuhan bibit. Hal ini ditunjukkan dengan nilai tertinggi pada semua variabel pertumbuhan, terutama pada perlakuan *pellet biochar* TKKS dosis 10% dan *pellet biochar* kayu karet dosis 10%.

5.2 Saran

Penelitian ini menunjukkan bahwa *biochar* dari TKKS dan kayu karet berpotensi meningkatkan kualitas tanah dan pertumbuhan bibit kelapa sawit.

Untuk itu, disarankan agar dilakukan penelitian lebih lanjut yang mencakup uji coba dalam jangka waktu yang lebih panjang guna mengetahui dampak *biochar* terhadap pertumbuhan tanaman hingga fase produktif. Penelitian lanjutan juga perlu mempertimbangkan pengaruh *biochar* terhadap parameter lain seperti produktivitas tandan buah segar, kualitas hasil panen, serta perubahan sifat tanah setelah aplikasi *biochar* dalam jangka menengah dan panjang.

Selain itu, penelitian ke depan dapat difokuskan pada kombinasi *biochar* dengan bahan pembenah tanah lainnya, seperti pupuk organik atau mikroorganisme tanah, untuk melihat potensi peningkatan efektivitas *biochar*. Penelitian juga sebaiknya dilakukan pada berbagai jenis tanah dan kondisi iklim yang berbeda agar hasilnya lebih aplikatif di berbagai wilayah. Dengan memperluas cakupan dan metode penelitian, penggunaan *biochar* dari limbah organik dapat dikembangkan menjadi teknologi yang lebih tepat guna dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan pengelolaan limbah yang ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. 2020. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 247.
- Andini, R., Sari, D. P., & Putra, I. G. 2023. Effect of rubberwood biochar on nutrient availability and growth of oil palm seedlings. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(1), 45–53.
- Arifin, M., Hasanah, U., & Santoso, B. 2023. Impact of oil palm kernel shell biochar on soil fertility and plant growth. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(1), 77–86.
- Arsyad, S. 2012. Konservasi Tanah dan Air. *Buku*. IPB Press. Bogor. 290 Hlm.
- Asmara, A., Tarigan, L. B., Riniarti, M., Prasetya, H., Hidayat, W., Niswati, A., Sukri Banuwa, I., dan Hasanudin, U. 2021. Pengaruh Biochar pada Simbiosis Rhizobium dan Akar Sengon Laut (*Paraserianthes falcataria*) dalam Media Tanam. *Journal of People, Forest and Environment*. 1: 11–20.
- Badan Pusat Statistik. 2019. *Statistik Perkebunan Indonesia 2018–2019: Komoditas Karet*. Jakarta: BPS RI.
- Basri, H., & Azis, A. 2011. *Pemanfaatan biochar sebagai pembenah tanah untuk meningkatkan produktivitas lahan pertanian*. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Bonanomi, G., Ippolito, F., & Scala, F. 2017. A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. *Journal of Plant Pathology*, 99(2), 433–440.
- Budai, A., Zimmerman, A. R., Cowie, A. L., Webber, J. B. W., Singh, B. P., Glaser, B., & Joseph, S. (2013). Biochar Carbon Stability Test Method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability. *International biochar initiative*, 1, 1-20.
- Budi, Yani, A., Nurhaida. 2018. Sifat Fisik Dan Mekanik Oriented Strand Board (Os) Kayu Karet (*Hevea Brasiliensis*) Berdasarkan Perlakuan Pendahuluan Dan Konsentrasi Perekat. *Jurnal Hutan Lestari*. 6(2):329–342.

- Chen, W., Meng, J., Han, X., Lan, Y. dan Zhang, W. 2019. Past, Present, and Future of Biochar. *Biochar*. 1: 75–87.
- Chen, W., Zhang, X., & Li, Y. 2022. Chemical and biological benefits of oil palm empty fruit bunch (EFB) biochar for soil fertility improvement. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102912.
- Dartius. 2011. *Analisis Pertumbuhan Tanaman. Skripsi*. Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Domingues, R. R., Sánchez-Monedero, M. A., Spokas, K. A., Melo, L. C., Trugilho, P. F., Valenciano, M. N., dan Silva, C. A. 2020. Enhancing Cation Exchange Capacity of Weathered Soils using Biochar: Feedstock, Pyrolysis Conditions and Addition Rate. *Agronomy* 10(6): 824.
- Downie, A., Munroe, P., & Cowie, A. 2015. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed., pp. 701–730).
- Dume, B., Berecha, G., & Tulu, S. 2016. Effect of biochar on soil properties and lead (Pb) availability in a contaminated soil. *International Journal of Environmental Sciences*, 5(3), 557–571.
- Duryat., Sylvain, R., Marck, P.C. 2013. Dynamic of Plantation of Oil Palm Small Holdings in Riau Province Sumatra Indonesia. *Jurnal Sylva Lestari*. 1(1): 93– 100.
- Elsaprike, J., Yahya, S. P. R., Yuwan. 2018. Pembuatan Arang dengan Metode Tungku Pirolisis Double Burner Menggunakan Limbah Kayu dengan Metode Manduk di Kecamatan Tebing Tinggi Kabupaten Empat Lawang. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan*. 7(2): 33–40.
- Evizal, R. Prasmatiw, F. E. 2023. Biochar: Pemanfaatan dan aplikasi praktis. *Jurnal Agrotropika*, 22(1), 1-12.
- Fagodiya, R. K., Sharma, R. K., & Chauhan, P. S. 2017. Effect of biochar application on soil properties and crop productivity: A review. *Journal of Environmental Biology*, 38(4), 537–544.
- Gani, A. 2010. *Teknologi pirolisis untuk konversi biomassa menjadi energi*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Energi, BPPT.
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C., dan Bibens, B. 2008. Effect of Low-Temperature Pyrolysis Conditions on Biochar for Agricultural Use. *T Asabe*. 51: 2061–2069.

- Glaser, B., Lehmann, J., dan Zech, W. 2002. Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in the Tropics with Charcoal. *A Review. Biol. Fertil. Soils*. 35: 219–230.
- Haryanti, A., Norsamsi, Sholiha, P. S. F. dan Putri, N. P. 2014. Studi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit. *Konversi*. 3 (2).
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Kim, S.D., Lee, S.H., Yoo, J.H. 2021a. Valorization of Indonesian Wood Wastes Through Pyrolysis: A Review. *Energies* 14(5): 1407.
- Haryanto, A., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., Hidayat, W. 2021b. Biomass Fuel from Oil Palm Empty Fruit Bunch Pellet: Potential and Challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 8(1): 33–42.
- Hidayat B., A. Rauf., T. Sabrina., dan Ali, J. 2018. The potential of some biomass as biochar for heavy metal Adsorbent. *Journal of Asian Scientific Research* . Vol 8, N0.11 293-300.
- Hwong, J. K., Tan, M. L., & Lee, S. Y. 2022. Impact of biochar on growth performance and yield of oil palm seedlings. *Journal of Agricultural Research and Development*, 11(1), 56–63.
- International Biochar Initiative. 2015. *Biochar for sustainable soils*.
- Iryani, D.A., Haryanto, A., Hidayat, W., Amrul, Talambanua, M., Hasanudin, U., Lee, S.H. 2019. Torrefaction Upgrading of Palm Oil Empty Fruit Bunches Biomass Pellets for Gasification Feedstock by Using COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Reactor. *7th TAE (Trend in Agricultural Engineering)*. 212–2017.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., & Bastos, A.C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.
- Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K. A., & Verheijen, F. G. (2015). Biochar effects on crop yield. In *Biochar for environmental management* (pp. 301-325). Routledge.
- Kong, C. H., Wang, P., Zhao, H., & Xu, X. H. 2014. Influence of biochar application on soil properties and nutrient retention. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3), 491–498.
- Kresnawaty, I., Putra, S. M., Budiani, A. & Darmono, T. W. 2017. Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) menjadi Arang Hayati dan Asap Cair. *J. Penelitian Pascapanen Pertanian*. 14 (3): 171–179.

- Kurniawan, T., Sari, L. P., & Hartono, D. 2019. Effects of biochar application on soil water retention and nutrient availability for plant growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 567–575.
- Lehmann, J., da Silva Jr., J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. 1999. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343–357.
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- Lehmann, J., dan Joseph, S. (2024). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Taylor & Francis.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
- Li, H., Dong, X., da Silva, E. B., de Oliveira, L. M., Chen, Y., & Ma, L. Q. 2020. Pelletized biochar from fast pyrolysis of biomass: Characteristics and environmental applications. *Science of the Total Environment*, 713, 136433.
- Maguire, R. O dan Agblevor, F. A. 2010. *Biochar in Agricultural Systems*. Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia.
- Mandiri. 2012. *Manual Pelatihan Teknologi Energi Terbarukan*. Gramedia. Jakarta.
- Marlina, N., & Sutrisno, B. 2020. Effect of oil palm kernel shell biochar application on the growth parameters of oil palm. *Journal of Plantation Crops*, 48(2), 112–119.
- Matangaran, J. R., Anggoro. R. 2012. Limbah Pemanenan Kayu Jati di Banyuwangi Jawa Timur 2012. *Jurnal Perennial*, 8 (2): 88–92.
- Mautuka, Z. A., Maifa, A., Karbeka, M. 2022. Pemanfaatan biochar tongkol jagung guna perbaikan sifat kimia tanah lahan kering. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(1), 201-208.
- Méndez, A., Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., & Gascó, J. M. 2019. The potential of wood-based biochar for soil carbon sequestration and fertility improvement. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 278, 1–10.

- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. 2023. Advances in densified biochar: Applications for sustainable supply chains and carbon footprint reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113211.
- Nabila, R., Hidayat, W., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Lee, S., Kim, S., Kim, S., Chun, D., Choi, H., Im, H., Lim, J., Kim, K., Jun, D., Moon, J., and Yoo, J. 2023. Oil Palm Biomass in Indonesia: Thermochemical Upgrading and its Utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 176: 113193.
- Nair, V. D., Nair, P. R., Dari, B., Freitas, A. M., Chatterjee, N., & Pinheiro, F. M. (2017). Biochar in the agroecosystem–climate-change–sustainability nexus. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2051.
- Nasution, A., Siregar, R. E., & Harahap, M. B. 2019. Pengelolaan limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi biochar sebagai solusi pencemaran lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(2), 101–108.
- Novita, R., Prasetyo, E., & Hidayat, R. 2022. Characterization of biochar derived from oil palm kernel shell and its effect on soil nutrient availability. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 23(3), 201–210.
- Nurkholifah, V., Rinarti, M., Prasetia, H., Hasanudin, U., Niswati, A., dan Hidayat, W. 2020. Karakteristik Arang dari Limbah Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*). *Seminar Nasional Konservasi 21 April 2020: Konservasi Sumberdaya Alam untuk Pembangunan Berkelanjutan*. 235–240.
- Nurlaeny, A., Firdaus, M., & Prasetyo, Y. 2022. Improvement of soil physical and chemical properties by biochar application for enhanced plant growth. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 17(3), 150–158.
- Pipíška, M., Krajčíková, E. K., Hvoštík, M., Frišták, V., Ďuriška, L., Černíčková, I., Kaňuchová, M., Conte, P., and Soja, G. 2022. Biochar from Wood Chips and Corn Cobs for Adsorption of Thioflavin T and Erythrosine B. *Materials* 15(4): 1492.
- Pratama, F. N., 2022. Produktivitas Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di Lahan Pasir Setelah Pengaplikasian Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Doctoral dissertation*, Universitas Muhammadiyah Malang.
- Pratiwi, I. A. dan H. D. Ardiansyah. 2019. A Study of Efb (Empty Fruit Bunch) for Fuel of Indonesian Biomass Boiler. *Eco. Env. and Cons.* 25.
- Putra, D. A., Suryani, E., & Lestari, N. 2023. Application of biochar for water retention and remediation of contaminated soils. *Journal of Environmental Remediation and Restoration*, 9 (1), 23–31.

- Putri, N. A., Rahman, F., & Hidayat, S. 2023. Influence of biochar feedstock type and application rate on soil properties and crop performance. *Journal of Environmental Management and Agriculture*, 10(1), 55–64.
- Putri, V. I., Mukhlis, dan Hidayat, B. 2017. Pemberian Beberapa Jenis Biochar untuk Memperbaiki Sifat Kimia Tanah Ultisol dan Pertumbuhan Tanaman Jagung. *Agroekoteknologi FP US*, 5(4).
- Rafiq, M. K., Bachmann, R. T., Rafiq, M. T., Shang, Z., Joseph, S., & Longworth, J. 2016. Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of biochar derived from biomass feedstocks. *Bioresource Technology*, 219, 533–542.
- Rahayu, S. E., dan Hasibuan, L. S. 2016. Analisis Pengaruh Investasi terhadap Perkembangan Industri di Kota Medan. *Jurnal Riset Akutansi dan Bisnis*. 10(1): 83–103.
- Rachma, E., & Malik, A. 2011. *Pemanfaatan limbah industri penggergajian kayu sebagai bahan baku alternatif*. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan, Badan Litbang Kehutanan.
- Rani, I. T., Yoo, J., Park, B. B., Hidayat, W., Wijaya, B. A., Lee, S., Kim, S., Choi, H., Chun, D., Im, H., & Kim, S. (2023). Wood Pellet Driven-Biochar Characterization Produced at Different Targeted Pyrolysis Temperatures. *Jurnal Sylva Lestari*. 11(3).
- Revaldi, F., Putra, A., & Ramadhan, H. 2022. Effects of biochar application on leaf count and root dry weight of oil palm seedlings. *Indonesian Journal of Plant Science*, 27(2), 78–85.
- Ridhuan, K., Irawan, D. dan Inthifawzi, R. 2019. Proses Pembakaran Pirolisis Dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan. *TURBO*. 8 (1).
- Ronsse, F., Van Hecke, S., Dickinson, D., & Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Gcb Bioenergy*, 5(2), 104-115.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Bakri, S. 2019. Karakterisasi Pelet Kayu Karet (*Hevea Brasiliensis*) Hasil Torefaksi dengan Menggunakan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (Comb). *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321–331.
- Salim, R., Cahyana, B. T., Prabawa, I. D. G. P., & Hamdi, S. (2019). Potensi bambu untuk pemanfaatan sebagai bahan bakar arang dengan metode pengarangan retort tungku drum. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 11(2), 230-241.

- Salmina, S., 2017. Studi Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit oleh Masyarakat di Jorong Koto Sawah Nagari Ujung Gading Kecamatan Lembah Melintang. *Jurnal Spasial*. Penelitian, Terapan Ilmu Geografi, dan Pendidikan Geografi. 6(2): 131642.
- Santi, R. 2017. *Pengaruh kombinasi biochar dan pupuk NPK-Mg terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit* (Skripsi). Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Saputra, J., dan Ardika, R. 2012. Potensi Biochar dari Limbah Biomassa Perkebunan Karet sebagai Amelioran dan Mengurangi Emisi Gas Rumah Kaca. *Warta Perkaretan* 31(1): 43–49.
- Sari, D. P., Nugroho, A., & Wahyudi, T. 2023. The effect of biochar application on soil water retention and nutrient uptake in oil palm seedlings. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 18(2), 123–131.
- Sarwono, R. 2016. Biochar sebagai penyimpan karbon, perbaikan sifat tanah, dan mencegah pemanasan global: tinjauan. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, 18(01), 79-90.
- Setiawan, A., Sajar, S., Marpaung, H. A. 2024. Biochar Tempurung Kelapa Dengan Sistem Retort Dan Aplikasi Pupuk Kohe Sapi Terhadap Pertumbuhan Bibit Tanaman Kopi Robusta (*coffea robusta* L.). *Serasi Media Teknologi*.
- Setiawan, B., Rosmalinda, dan Jannah, W. C. 2022. Pengaruh Pemberian Biochar Tandan Kosong Kelapa Sawit terhadap Pertumbuhan Stek Lada pada Lapisan Tanah Subsoil Ultisol. *Journal of Agro Plantation (JAP)*, 1(2).
- Shaaban, A., Se, S. M., Dimin, M. F., Juoi, J. M., Husin, M. H. M., & Mitan, N. M. M. (2014). Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107, 31-39.
- Simarmata, T. 2008. Teknologi Intensifikasi Padi Aerob Terkendali Berbasis Organik untuk Melipat Gandakan Produksi Padi dan Mempercepat Pencapaian Kedaulatan Pangan di Indonesia. *Universitas Pajajaran*, Bandung.
- Siregar, M., Lubis, R., & Situmorang, A. 2021. The impact of oil palm kernel shell biochar on soil organic matter and micronutrient content for oil palm growth. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*, 49(1), 35–44.
- Soedradjad, R., Soeparjono, S. 2022. Respon pertumbuhan tanaman jagung terhadap aplikasi biochar pada lahan kering dengan dua sistem irigasi. *Jurnal Ilmiah Hijau Cendekia*, 7(1), 26-34.

- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in agronomy*, 105, 47-82.
- Sopiah, N., Prasetyo, D. dan Aviantara, D. B. 2017. Pengaruh Aktivasi Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit terhadap Adsorpsi Kadmium Terlarut. *J. Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*. 8 (2): 55-66.
- Steiner, C., W. G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J. L. V. de Macêdo, W. E. H. Blum, W. Zech. 2007. Long Term Effects of Manure, Charcoal and Mineral Fertilization on Crop Production and Fertility on a Highly Weathered Central Amazonian Upland Soil. *Plant soil*. 291: 275-290.
- Subekti, R., Wijaya, S., & Putra, A. 2016. Effect of wood biochar application on soil pH and chemical properties of acid soil. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 17(2), 101–110.
- Sugiarto, A., Pratama, B., & Wibowo, H. 2020. Effects of biochar application on soil structure improvement and nutrient availability in agricultural land. *Journal of Environmental Science and Technology*, 12(4), 210–218.
- Sugiarto, T., Sartohadi, J., Pulungan, N. A. H. J., Ngadisih, N., Praharto, Y. B., Hidayati, N. 2024. Inovasi Reaktor Pirolisis Produksi Biochar Berbahan Baku Organic Waste Slurry Dari Sampah Perkotaan Terpilah Dengan Kontrol Tekanan. In *Prosiding Seminar Hasil Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (SEHATI ABDIMAS)* Vol. 7, No. 1, pp. 180-191).
- Suharyatun, S., Warji, W., Haryanto, A., Anam, K. 2021. Pengaruh kombinasi biochar sekam padi dan pupuk organik berbasis mikroba terhadap pertumbuhan dan produksi sayuran. *Teknotan: Jurnal Industri Teknologi Pertanian*, 15(1), 21-26.
- Sun, Q., Liu, Y., Liu, H., dan Dumroese, R. K. 2020. Interaction of Biochar Type and Rhizobia Inoculation Increases the Growth and Biological Nitrogen Fixation of *Robinia pseudoacacia* Seedlings. *Forests*. 11 (6): 711.
- Sun, Y., Gao, B., Zhang, M., & Wang, J. 2022. Long-term effects of biochar on soil organic carbon and fertility in different soil types: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 831, 154857.
- Susanto, J. P., Santoso, A. D. dan Suwedi, N. 2017. Perhitungan potensi limbah padat kelapa sawit untuk sumber energi terbaharukan dengan metode lca. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 18 (2) : 165-172.
- Sutoyo. 2018. Pemanfaatan Limbah Sayuran Sebagai Bahan Baku Pembuatan Pupuk Organik di Kabupaten Wonogiri. *Adi Widya*. 113–121.
- Sutrisno, L. 2013. Pemanfaatan Limbah Kayu Mahang (*Macaranga* Sp) dari Industri Penggergajian Kayu sebagai Bahan Pembuatan Cuka Kayu (Wood

- 42 Vinegar). *Skripsi*. Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Riau. 29 hlm.
- Tambunan, S., Siswanto, B. dan Handayanto, E. 2014. Pengaruh Aplikasi Bahan Organik Segar dan Biochar terhadap Ketersediaan P dalam Tanah di Lahan Kering Malang Selatan. *J. Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 1(1): 85–92.
- Tarigan, A. D dan Nelvia. 2020. Pengaruh Pemberian *Biochar* Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Mikoriza terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Jagung Manis (*Zea mays* l.) di Tanah Ultisol. *J. Agroekotek*. 12 (1): 23–37.
- Varma, A. K., Mondal, P., & Varma, A. 2018. Pyrolysis of biomass: A sustainable way for production of bioenergy and biochar. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 437–449.
- Wahyuni, S., Rahmawati, D., & Kusuma, I. 2020. The influence of oil palm kernel shell biochar on growth and chlorophyll content of oil palm seedlings. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(4), 245–252.
- Wahyuni, S., Kadarwati, S., Aprilia, R. 2023. Biofertilizer Berbasis Biochar Untuk Remediasi Lahan Pertanian Indonesia. *Bookchapter Alam Universitas Negeri Semarang*, (2), 145-177.
- Wang, Lin, X., Zhang, X., Show, P. L. 2024. Research Advances on Production and Application of Algal Biochar in Environmental Remediation. *Environmental Pollution* 348(1).
- Wardani, A. P. K. dan Widiawati, D., 2014. Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Material Tekstil dengan Pewarna Alam untuk Produk Kriya. *Doctoral dissertation*, Bandung Institute of Technology, 1–10.
- Warlina, L., Ilim, I., Simanjuntak, W. 2013. Pengolahan Limbah Cair Hotel dengan Kombinasi Metode Elektrokoagulasi dan Adsorpsi Menggunakan Karbosil. *Jurnal Sylva Lestari*. 1(1): 85–92.
- Wibowo, T. I. R., Riniarti, M., Prasetya, H., Hasanudin, U., Niswati, A., dan Hidayat, W. 2020. Karakterisasi Arang Hayati dari Limbah Kayu Sengon (*Falcataria moluccana*) dan Meranti (*Shorea* sp.). *Seminar Nasional Konservasi* 21 April 2020: Konservasi Sumberdaya Alam untuk Pembangunan Berkelanjutan. 560–563.
- Woolf, D., Lehmann, J., & Lee, D. R. (2016). Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration. *Nature communications*, 7(1), 13160.
- Woolf, D., Lehmann, J., Cowie, A., Cayuela, M. L., Whitman, T., & Sohi, S. 2018. Biochar for climate change mitigation. *Soil and climate*, 219-248.

- Woolf, D., Lehmann, J., Lee, D. R., Monreal, C., & Joseph, S. 2021. Biochar is a reliable and scalable carbon removal technology. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 329–334.
- Xie, Z., Chen, B., & Li, Z. 2021. Effects of biochar on soil physical properties and plant growth: A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(4), 423–435.
- Xu, H. J., Wang, X. H., Li, H., Yao, H. Y., Su, J. Q., & Zhu, Y. G. (2014). Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape. *Environmental science & technology*, 48(16), 9391-9399.
- Yrjälä, K., Ramakrishnan, M., and Salo, E. 2022. Agricultural Waste Streams as Resource in Circular Economy for Biochar Production Towards Carbon Neutrality. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 26: 100339.
- Yuan, H., Lu, T., Huang, H., Zhao, D., & Kobayashi, N. 2021. Biochar for climate change mitigation: Carbon stability and greenhouse gas emission reduction potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110370.
- Yulianti, S., Nugroho, R., & Hartono, P. 2019. Effect of biochar application on cation exchange capacity and soil fertility. *Indonesian Journal of Soil Science*, 14(3), 145–152.
- Zhang, L., Wang, Y., & Chen, H. 2021. Effects of lignocellulosic biochar on soil pH and nutrient availability. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(5), 489–498.
- Zhu, Z., Zhang, Y., Tao, W., Zhang, X., Xu, Z., dan Xu, C. 2025. The Biological Effects of Biochar on Soil's Physical and Chemical Characteristics: A Review. *Sustainability* 17(5): 2214.