

**PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TANAH TERHADAP
Cu DAN Zn PADA TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT
PERLAKUAN *BIOCHAR* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT**

(Skripsi)

Oleh

**NESA PRADANI
NPM 2114181024**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TANAH TERHADAP
Cu DAN Zn PADA TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT
PERLAKUAN *BIOCHAR* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT**

Oleh

NESA PRADANI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA PERTANIAN**

Pada

**Jurusan Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TANAH TERHADAP Cu DAN Zn PADA TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT PERLAKUAN *BIOCHAR* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT

Oleh

NESA PRADANI

Tembaga dan Zn merupakan unsur hara mikro esensial untuk pertumbuhan tanaman. Logam berat ini dapat beracun bagi makhluk hidup jika berada pada konsentrasi yang relatif tinggi dibandingkan dengan tingkat kritisnya, biasanya terjadi akibat pencemaran. Pencemaran tanah dapat disebabkan oleh tingginya perkembangan industri, salah satunya adalah industri sendok logam. *Biochar* dapat menjadi solusi untuk mengatasi ketersediaan dan pergerakan logam berat di tanah melalui kemampuannya dalam menjerap logam berat. Percobaan ini dilakukan untuk mempelajari perubahan kapasitas (b) dan energi jerap (K) tanah tercemar logam berat Cu dan Zn yang diperlakukan *biochar*.

Percobaan ini dilakukan di Rumah Plastik Perguruan Tinggi Al-Madani, Laboratorium Ilmu Tanah Universitas Lampung, dan UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung pada bulan Mei-November 2024. Perlakuan disusun dengan Rancangan Acak Lengkap 2 faktor. Faktor pertama yaitu tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri berlogam berat (S) dan faktor kedua yaitu *biochar* TKKS (B) dengan 3 ulangan. Perbedaan antarpelakuan dianalisis menggunakan *Standard Error of the Mean* (SEM) dan diuji korelasinya menggunakan *Simple* dan *Multiple Linear Regression*.

Hasil penelitian menunjukkan (1) b_{Cu} menurun dan K_{Cu} meningkat dengan meningkatnya riwayat perlakuan limbah industri. Nilai kapasitas jerap maksimum (b_{Zn}) dan energi jerap (K_{Zn}) tidak dapat digambarkan dengan isothermal Langmuir, (2) kapasitas jerap maksimum (b_{Cu}) menurun pada dosis B₁ dan meningkat pada dosis B₂, sedangkan nilai energi jerap (K_{Cu}) meningkat pada dosis B₁ dan menurun pada dosis B₂, (3) b_{Cu} berkorelasi negatif dengan ketersediaan Cu dan Zn, pH, dan C-organik dan berkorelasi positif dengan kadar liat. K_{Cu} berkorelasi negatif dengan kadar liat dan berkorelasi positif dengan ketersediaan Cu dan Zn, pH, dan C-organik.

Kapasitas adsorpsi maksimum terhadap Cu (b_{Cu}) berbanding lurus dengan Zn tersedia, pH, kadar liat, dan KTK dan berbanding terbalik dengan Cu tersedia dan C-organik. Konstanta energi jerap terhadap Cu (K_{Cu}) berbanding lurus dengan Cu tersedia, C-organik, dan KTK dan terbalik dengan Zn tersedia, pH, dan kadar liat.

Kata kunci: adsorpsi, *biochar*, energi jerap, kapasitas jerap, logam berat

ABSTRACT

CHANGES IN SOIL ADSORPTION CAPACITY AND ENERGY FOR Cu AND Zn IN HEAVY METALS CONTAMINATED SOILS TREATED WITH OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCHES *BIOCHAR*

By

NESA PRADANI

Copper and Zn are essential micronutrients for plant growth. These heavy metals can become toxic to living organisms if exceeding their critical thresholds, often due to pollution. Soil pollution may be attributed to the rapid development of industries, such as the metal spoon industry. Biochar can be a solution to manage heavy metal availability and mobility in soils due to its heavy metal adsorption capacity. This experiment was conducted to study the changes in adsorption capacity (b) and energy (K) of soil contaminated with heavy metals Cu and Zn treated with biochar.

The experiment was carried out in the greenhouse of Perguruan Tinggi Al-Madani, Soil Science Laboratory Universitas Lampung, and UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung from May to November 2024. The treatments were arranged in a completely randomized design with two factors. The first factor was soil with heavy metal industrial waste treatment (S) and the second factor was oil palm empty fruit bunches biochar (B), each with three replications. Treatment differences were analyzed using SEM, and correlations were examined using simple and multiple linear regression.

The results showed (1) b_{Cu} decreased K_{Cu} increased with increasing industrial waste treatment history. b_{Zn} and K_{Zn} cannot be described using Langmuir isotherms; (2) maximum adsorption capacity (b_{Cu}) decreased with the B_1 and increased with the B_2 , meanwhile adsorption energy (K_{Cu}) increased with the B_1 and decreased with the B_2 ; and (3) b_{Cu} is negatively correlated with Cu, Zn, soil pH, and organic carbon, while clay content is positively correlated. K_{Cu} negatively correlated with clay content also positively correlated with Cu, Zn, pH, and organic carbon. Maximum adsorption capacity (b_{Cu}) is directly proportional to Zn, pH, clay

clay content, and CEC and inversely proportional to Cu and organic carbon. The adsorption energy constant (K_{Cu}) is directly proportional to Cu, organic carbon, and CEC, inversely to Zn, pH, and clay content.

Keywords: adsorption, adsorption capacity, adsorption energy, biochar, heavy metals

Judul Skripsi : PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI
JERAP TANAH TERHADAP Cu DAN Zn PADA
TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT
PERLAKUAN *BIOCHAR* TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT

Nama Mahasiswa : *Nesa Pradani*

Nomor Pokok Mahasiswa : 2114181024

Program Studi : Ilmu Tanah

Fakultas : Pertanian



1. Komisi Pembimbing

Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D.
NIP 196011091985031001

Nur Afni Afrianti, S.P., M.Sc.
NIP 198404012012122002

2. Ketua Jurusan Ilmu Tanah

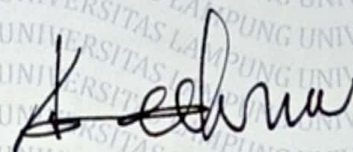
Ir. Hery Novpriansyah, M.Si.
NIP 196611151990101001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D.



Sekretaris

: Nur Afni Afrianti, S.P., M.Sc.



Anggota

: Dr. Supriatin, S.P., M.Sc.



2. Dekan Fakultas Pertanian



: Dr. H. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP.196411181989021002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 Desember 2024

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TANAH TERHADAP Cu DAN Zn PADA TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT PERLAKUAN *BIOCHAR* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT”** adalah hasil karya saya sendiri, bukan hasil karya milik orang lain.

Penelitian ini adalah bagian dari penelitian salah satu Dosen Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, yaitu Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D. yang sumber dananya bersifat pribadi kepemilikannya.

Adapun, bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini dikutip dari hasil karya orang lain dan telah saya tuliskan sumbernya secara jelas dan sesuai kaidah Pedoman Karya Ilmiah Universitas Lampung tahun 2020. Jika di kemudian hari terbukti skripsi ini merupakan hasil karya orang lain atau dibuat oleh orang lain maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku di Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 12 Desember 2024

Penulis,



Nesa Pradani

NPM 2114181024

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Sungai Langka, Pesawaraan, Lampung pada tanggal 01 November 2002 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara, dari Bapak Eko Hendri dan Ibu Neli Astri.

Pendidikan penulis dimulai dari Taman Kanak-kanak (TK) Setia Kawan yang diselesaikan pada tahun 2008, Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN 1 Karang Maritim pada tahun 2014, Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan di SMPN 4 Bandar Lampung pada tahun 2017, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) diselesaikan di SMAN 3 Bandar Lampung pada tahun 2020.

Pada tahun 2021 penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif menjadi asisten beberapa mata kuliah, seperti Biologi (2023/2024 Ganjil dan 2024/2025 Ganjil), Dasar-dasar Ilmu Tanah (2023/2024 Ganjil, 2023/2024 Genap, dan 2024/2025 Ganjil), Ilmu Tanah dan Kesuburan (2024/2025 Ganjil), Statistika Dasar (2024/2025 Ganjil), Teknik Penelitian (2023/2024 Genap), Genesis dan Klasifikasi Tanah (2023/2024 Genap), serta

Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman (2024/2025 Ganjil). Selain menjadi asisten praktikum ataupun asisten dosen, selama menjadi mahasiswa penulis juga aktif di beberapa organisasi, seperti Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Pertanian Universitas Lampung (BEM FP Unila) sebagai Staf Ahli Pengelolaan Sumber Daya Manusia, Gabungan Mahasiswa Ilmu Tanah Unila (Gamatala) sebagai Anggota Bidang Penelitian dan Pengembangan, UKM-U Sains dan Teknologi Universitas Lampung (UKM-U Saintek Unila) sebagai Anggota Departemen Manajemen Sumber Daya, dan Forum Ilmiah Mahasiswa FP Unila (Filma FP Unila) sebagai Tutor Akademik Mahasiswa Baru Jurusan Ilmu Tanah FP Unila. Selain itu, pada awal tahun 2024 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Tirtalaga, Mesuji dan pada pertengahan tahun 2024 penulis melaksanakan Praktik Umum di UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung sebagai Analis Logam Berat yang melakukan analisis kandungan logam berat pada sampel uji air.

*To my parents, my steadfast pillars of strength,
and refuge in the tempestuous currents of life.
Your unwavering love and support have ever
been my haven of solace and tranquility.*

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat, hidayah, serta nikmat yang tak terhingga sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap Tanah terhadap Cu dan Zn pada Tanah Tercemar Logam Berat akibat Perlakuan *Biochar* Tandan Kosong Kelapa Sawit” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Pertanian di Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, dengan segenap rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
2. Bapak Ir. Hery Novpriansyah, M.Si., selaku Ketua Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D., selaku pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, saran, semangat, dan dana kepada penulis selama proses penelitian hingga terbitnya skripsi ini.
4. Ibu Nur Afni Afrianti, S.P., M.Sc., selaku pembimbing kedua yang telah dengan sabar memberikan bimbingan dan motivasi dari awal penyusunan skripsi hingga terbitnya skripsi ini.
5. Ibu Dr. Supriatin, S.P., M.Sc., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, arahan, dan kritik membangun demi kesempurnaan skripsi ini.
6. Para Dosen Jurusan Ilmu Tanah FP Unila yang luar biasa, terima kasih untuk semua bimbingan, ilmu, motivasi, dan kesempatan yang telah diberikan kepada penulis selama penulis berkuliah sehingga membentuk kepribadian dan kemampuan yang lebih baik untuk diri penulis sendiri.

7. UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung yang sudah penulis anggap seperti keluarga sendiri, terima kasih atas segala bantuannya dalam pelaksanaan analisis logam berat serta atas canda tawa yang kita bagi bersama.
8. Bapak Feri Eriyadi, S.Si. dan Bapak M. Irham Hidayat, S.KM. yang telah dengan sabar dan ikhlas membantu penulis dalam pelaksanaan analisis logam berat di UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung.
9. Bapak Parman yang telah membantu dalam pengambilan contoh tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri di Sidosari, Natar, Lampung Selatan.
10. Kedua orang tuaku tercinta, Bapak Eko Hendri dan Ibu Neli Astri, yang tiada hentinya terus mendoakan, memberi semangat, dan curahan kasih sayang sehingga penulis mampu menyelesaikan perkuliahan ini.
11. Kedua adikku tersayang, Raihan Ananda Hendri Dwika dan Firas Hendrisar Putra, yang terus memberikan semangat dan sebagai salah satu motivasi terbesar penulis untuk dapat menyelesaikan perkuliahan secepat mungkin.
12. Kakek dan Nenekku tersayang, Alm. Bapak Kabri Ali, Ibu Daslina, dan Alm. Ibu Afrida, terima kasih atas segala doa, dukungan, dan motivasi yang diberikan sehingga penulis dapat mencapai titik ini.
13. Keluarga besar penulis, terima kasih atas segala bantuan, kasih sayang, dan motivasi yang telah diberikan sejak awal penulis menduduki bangku kuliah hingga saat ini.
14. Mas Adi, Mba Eci, Mba Ellen, Mba Wiwik, dan Mas Hendra atas segala bantuan yang diberikan selama penulis melakukan analisis di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
15. Mba Astrid selaku Admin Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung terima kasih atas bantuannya pada proses administrasi yang penulis jalani sejak awal komisi pembimbing hingga selesai melaksanakan ujian komprehensif.
16. Staf Yayasan Pendidikan Global Madani atas segala bantuan yang diberikan selama proses bimbingan yang penulis jalani.

17. Teman berbagi cerita penulis, Alya Shoraya dan Inggit Putri Mediva terima kasih untuk semua cerita dan dukungan yang telah kita bagi bersama.
18. Rekan-rekan asisten mata kuliah DDIT, Natasya, Vina, Jupe, Divani, dan Fariz terima kasih untuk semua bantuan dan canda tawa yang telah kita bagi bersama.
19. Rekan-rekan KKN Desa Tirtalaga, Ela, Alya, Alvira, Afif, Durra, dan Dika terima kasih sudah kebersamai, membantu, dan mendukung penulis dari awal pembuatan skripsi pada bulan Januari 2023 hingga sekarang.
20. Rekan-rekan Ilmu Tanah 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, dan 2024 atas segala sukacita dan bantuan yang diberikan selama masa perkuliahan.
21. Seseorang yang dengan ada atau tidak ada kehadirannya secara langsung yang selalu memotivasi penulis untuk menjadi pribadi yang lebih baik dan bertanggung jawab. Sukses selalu.

Bandar Lampung, 12 Desember 2024



Nesa Pradani

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	XV
DAFTAR GAMBAR	XX
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan	5
1.4 Kerangka Pemikiran.....	6
1.5 Hipotesis	11
II. TINJAUAN PUSTAKA	12
2.1 Dampak Buruk Logam Berat dan Mitigasinya dengan <i>Biochar</i>	12
2.2 Limbah Sawit di Indonesia	14
2.3 Kapasitas Jerap Tanah terhadap Logam Berat	15
2.4 Kapasitas Jerap Ditunjukkan oleh Kapasitas Adsorpsi Maksimum dan Konstanta Energi Adsorpsi dalam Persamaan Isotermal Langmuir.....	16
2.5 Deskripsi Penjerapan Logam Berat dengan Menggunakan Persamaan Langmuir Isotermik	17
III. METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Waktu dan Tempat.....	18
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.3 Metode	19
3.4 Pelaksanaan Penelitian.....	20
3.4.1 Pengambilan Contoh Tanah.....	20
3.4.2 Penyiapan <i>Biochar</i>	21

3.4.3 Pelaksanaan Percobaan.....	22
3.5 Peubah Pengamatan	23
3.5.1 Peubah Utama.....	23
3.5.2 Peubah Pendukung	23
3.6 Analisis Data.....	24
3.7 Penetapan Nilai b dan K dengan Isotermal Langmuir.....	24
3.7.1 Percobaan Laboratorium untuk Menentukan Persamaan Langmuir	24
3.7.2 Penentuan Konsentrasi Keseimbangan M dalam ppm atau mg L ⁻¹	25
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Sifat Tanah Awal dengan Riwayat Perlakuan Limbah Industri	28
4.2 Perubahan Kapasitas (b) dan Konstanta Energi (K) Jerap terhadap Cu pada Tanah Tercemar Logam Berat akibat Perlakuan <i>Biochar</i> Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	36
4.3 Perubahan Beberapa Sifat Tanah dengan Riwayat Perlakuan Limbah Industri akibat Perlakuan <i>Biochar</i> Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	38
4.4 Korelasi antara Kapasitas (b) dan Energi (K) Jerap dengan Beberapa Sifat Tanah	42
V. KESIMPULAN DAN SARAN	48
5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
	<u>Nas</u>	
1.	Contoh tanah yang diambil dari lahan percobaan Sidosari.....	21
2.	Dosis <i>biochar</i> setiap perlakuan.....	22
3.	Peubah dan metode analisis yang digunakan.....	24
4.	Pencampuran contoh tanah dengan larutan logam.....	25
5.	Beberapa sifat tanah awal dengan perlakuan limbah industri.....	28
6.	Kapasitas (b) dan konstanta energi (K) jerap tanah terhadap Cu pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri.....	33
7.	Pengaruh <i>biochar</i> TKKS (b) terhadap kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dalam tanah.....	37
8.	Pengaruh <i>biochar</i> TKKS terhadap beberapa sifat tanah.....	39
9.	Korelasi antara kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah dengan beberapa sifat tanah.....	43
	<u>Lampiran</u>	
10.	Hasil pembacaan konsentrasi larutan Cu untuk penentuan b dan K.....	64
11.	Hasil pembacaan konsentrasi larutan Zn untuk penentuan b dan K.....	64
12.	Konsentrasi awal (C) dan konsentrasi supernatan (M) Cu untuk penetapan b dan K terhadap Cu.....	65
13.	Konsentrasi awal (C) dan konsentrasi supernatan (M) Zn untuk penetapan b dan K terhadap Zn.....	70
14.	Konsentrasi dan absorbansi larutan standar Cu.....	75
15.	Konsentrasi dan absorbansi larutan standar Zn.....	75

16.	Pengaruh pemberian <i>biochar</i> terhadap kapasitas (b) dan energi jerap tanah (K) terhadap Cu.....	76
17.	Pengaruh pemberian <i>biochar</i> terhadap beberapa sifat tanah.....	76
18.	Uji perbedaan nilai b_{Cu} pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	77
19.	Uji perbedaan nilai K_{Cu} pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	77
20.	Uji perbedaan Cu tersedia pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	77
21.	Uji perbedaan Zn tersedia pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	77
22.	Uji perbedaan pH pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	78
23.	Uji perbedaan C-organik pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	78
24.	Uji perbedaan kadar liat pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	78
25.	Uji perbedaan KTK pada sampel tanah awal dengan riwayat perlakuan limbah industri menggunakan SEM.....	78
26.	Uji perbedaan b_{Cu} pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	79
27.	Uji perbedaan K_{Cu} pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	79
28.	Uji perbedaan Cu tersedia pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	79
29.	Uji perbedaan Zn tersedia pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	80
30.	Uji perbedaan pH pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	80
31.	Uji perbedaan C-organik pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	80

32. Uji perbedaan kadar liat pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	81
33. Uji perbedaan KTK pada sampel tanah setelah pengaplikasian <i>biochar</i> (b) menggunakan SEM.....	81
34. Statistik regresi untuk hubungan antara b_{Cu} dan Cu tersedia.....	81
35. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi b_{Cu} terhadap Cu tersedia.....	82
36. Koefisien regresi untuk peubah Cu tersedia dan intersep.....	82
37. Statistik regresi untuk hubungan antara b_{Cu} dan Zn tersedia.....	82
38. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi b_{Cu} terhadap Zn tersedia.....	82
39. Koefisien regresi untuk peubah Zn tersedia dan intersep.....	82
40. Statistik regresi untuk hubungan antara b_{Cu} dan pH.....	82
41. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi b_{Cu} terhadap pH..	83
42. Koefisien regresi untuk peubah pH dan intersep.....	83
43. Statistik regresi untuk hubungan antara b_{Cu} dan C-organik.....	83
44. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi b_{Cu} terhadap C-organik.....	83
45. Koefisien regresi untuk peubah C-organik dan intersep.....	83
46. Statistik regresi untuk hubungan antara b_{Cu} dan kadar liat.....	83
47. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi b_{Cu} terhadap kadar liat.....	84
48. Koefisien regresi untuk peubah kadar liat dan intersep.....	84
49. Statistik regresi untuk hubungan antara b_{Cu} dan KTK.....	84
50. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi b_{Cu} terhadap KTK.....	84
51. Koefisien regresi untuk peubah KTK dan intersep.....	84

52. Statistik regresi untuk hubungan antara b_{Cu} dan seluruh peubah pendukung.....	84
53. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi b_{Cu} terhadap seluruh peubah pendukung.....	85
54. Koefisien regresi untuk seluruh peubah pendukung dan intersep.....	85
55. Statistik regresi untuk hubungan antara K_{Cu} dan Cu tersedia.....	85
56. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi K_{Cu} terhadap Cu tersedia.....	85
57. Koefisien regresi untuk peubah Cu tersedia dan intersep.....	85
58. Statistik regresi untuk hubungan antara K_{Cu} dan Zn tersedia.....	86
59. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi K_{Cu} terhadap Zn tersedia.....	86
60. Koefisien regresi untuk peubah Zn tersedia dan intersep.....	86
61. Statistik regresi untuk hubungan antara K_{Cu} dan pH	86
62. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi K_{Cu} terhadap pH ..	86
63. Koefisien regresi untuk peubah pH dan intersep.....	86
64. Statistik regresi untuk hubungan antara K_{Cu} dan C -organik.....	87
65. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi K_{Cu} terhadap C -organik.....	87
66. Koefisien regresi untuk peubah C -organik dan intersep.....	87
67. Statistik regresi untuk hubungan antara K_{Cu} dan kadar liat.....	87
68. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi K_{Cu} terhadap kadar liat.....	87
69. Koefisien regresi untuk peubah kadar liat dan intersep.....	87
70. Statistik regresi untuk hubungan antara K_{Cu} dan KTK	88
71. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi K_{Cu} terhadap KTK	88
72. Koefisien regresi untuk peubah KTK dan intersep.....	88

73. Statistik regresi untuk hubungan antara K_{Cu} dan seluruh peubah pendukung.....	88
74. Analisis ragam untuk uji signifikansi model regresi K_{Cu} terhadap seluruh peubah pendukung.....	88
75. Koefisien regresi untuk seluruh peubah pendukung dan intersep.....	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
	<u>Nas</u>	
1.	Grafik persamaan isotermaal Langmuir.....	9
2.	Kerangka pemikiran perubahan kapasistas dan energi jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat akibat perlakuan <i>biochar</i> tandan kosong kelapa sawit.....	10
3.	Tata letak satuan percobaan dalam Rancangan Acak Lengkap (RAL).....	19
4.	Pengambilan contoh tanah dari petak percobaan tahun 1998.....	20
5.	Inkubasi kombinasi perlakuan secara kapiler.....	23
6.	Isotermaal Langmuir Cu.....	34
7.	Isotermaal Langmuir Zn.....	36
	<u>Lampiran</u>	
8.	Konsentrasi awal larutan Cu untuk penentuan b dan K.....	64
9.	Konsentrasi awal larutan Zn untuk penentuan b dan K.....	64
10.	Kurva kalibrasi standar Cu untuk penetapan b dan K terhadap Cu serta pengukuran Cu tersedia.....	75
11.	Kurva kalibrasi standar Zn untuk penetapan b dan K terhadap Zn serta pengukuran Zn tersedia.....	75

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berbagai negara pada saat ini terancam akan mengalami krisis pangan yang disebabkan oleh ketersediaan lahan dan produksi pangan yang tidak mampu mengimbangi pertumbuhan jumlah penduduk. Krisis pangan sudah menjadi faktor pembatas bagi semua negara, baik negara miskin, negara berkembang, maupun negara maju (Dewi dan Ginting, 2012). Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS), diketahui bahwa jumlah penduduk di Indonesia terus meningkat, bahkan pada tahun 2023 telah mencapai 278 juta orang dengan laju pertumbuhan 1,13%. Laju pertumbuhan penduduk tersebut dianggap cukup tinggi sehingga dapat menjadi ancaman terhadap ketersediaan lahan pertanian yang berkelanjutan. Jumlah penduduk dan kebutuhan pangan selaras dengan ketersediaan lahan akan terus meningkat. Namun, ketersediaan lahan akan berbanding terbalik dengan hal-hal tersebut karena ketersediaan lahan bersifat stagnan (Imansyah dkk, 2020). Jika ketersediaan lahan tidak mengalami perluasan maka dibutuhkan setidaknya lahan pertanian yang baik dan mampu menjadi media bagi pertumbuhan tanaman di atasnya.

Lahan pertanian yang mampu menyokong kebutuhan penduduk adalah lahan pertanian bersifat berkelanjutan. Lahan pertanian yang bersifat berkelanjutan memiliki arti bahwa lahan pertanian tersebut harus berkesinambungan ditinjau dari kepentingan ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam memanfaatkan lingkungan (Mawara, 2017). Lahan pertanian harus terhindar dari berbagai pencemaran. Namun, hal tersebut sepertinya sulit untuk dicapai di Indonesia karena menurut data dari BPS pada tahun 2021, terdapat 1499 desa/kelurahan di

Indonesia yang tanahnya telah tercemar, salah satunya oleh logam berat. Pencemaran tanah oleh logam berat ini berbahaya karena logam berat bersifat toksik. Logam berat dapat meracuni organisme non-target, terutama biota tanah dan juga dapat meracuni lingkungan (Boymau, 2023). Lebih lanjut lagi, pencemaran logam berat ini dapat terbawa hingga memasuki rantai makanan manusia (Juhri, 2017).

Pencemaran tanah oleh limbah berlogam berat dapat menurunkan kesehatan tanah, salah satunya melalui penurunan pH tanah yang dapat menjadikan tanah di daerah tropika semakin masam. Tanah yang masam tersebut akan meningkatkan kelarutan logam berat di dalam tanah sehingga sangat tersedia untuk tanaman (Szabela dkk., 2015). Penurunan pH juga akan menjadikan kapasitas tukar kation (KTK) tanah menurun karena KTK tanah sejalan dengan pH tanah (Mautuka dkk., 2022). KTK tanah merupakan sifat tanah yang sangat penting terkait perilaku kapasitas jerap tanah terhadap logam berat karena KTK merupakan parameter penting dari kapasitas jerap tanah (Salam, 2020). Tingkat kemasaman tanah dan kemampuan tanah dalam menjerap dan mempertukarkan kation ini berperan dalam menentukan ketersediaan ataupun pengikatan logam oleh tanah pada koloid tanah (Mulyani dkk., 2023). Pada koloid tanah atau biasa disebut juga kompleks jerapan tanah yang tercemar logam berat saat kondisi asam, larutan tanahnya dipenuhi oleh ion H^+ yang dapat menggantikan posisi kation-kation logam berat pada kompleks jerapan. Logam berat tersebut akhirnya akan berpindah dari kompleks jerapan menuju larutan tanah sehingga kelarutan logam berat meningkat (Alloway, 2005).

Ketersediaan logam berat di dalam tanah dapat dilihat dari kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K) dalam persamaan Langmuir Isotermal. Kapasitas adsorpsi maksimum (b) merupakan jumlah maksimum adsorbat yang dapat dimuat pada suatu adsorben (Szulejko dan Kim, 2019). Konstanta energi adsorpsi (K) adalah konstanta pengikat Langmuir yang menggambarkan interaksi antara adsorbat pada lapisan tunggal (*monolayer*) pertama dan permukaan padat (Swenson dan Stadie, 2019). Nilai K yang besar menunjukkan adanya interaksi yang kuat antara adsorbat dan adsorben sedangkan

nilai K yang lebih kecil menunjukkan interaksi yang lemah antara adsorbat dan adsorben (Anjum dkk., 2023). Adsorpsi pada tanah atau dalam hal ini adalah nilai b dan K pada tanah terbukti berkaitan erat dengan sifat-sifat tanah, seperti pH tanah, kandungan bahan organik tanah, kapasitas tukar kation, dan fraksi liat pada tanah (Jiang dkk., 2021). Nilai b dan K akan menurun beriringan dengan menurunnya sifat-sifat tanah tersebut.

Tanah pada lokasi penelitian ini merupakan tanah Ultisol (Salam dkk., 1998) yang sifatnya bertolak belakang dalam mendukung proses adsorpsi logam berat pada tanah. Tanah Ultisol memiliki karakteristik kimia berupa pH, KTK, dan kandungan bahan organik yang rendah (Yuniarti dkk., 2023). Tanah pada lokasi penelitian yang berada di Sidosari, Natar pada Juli tahun 1998 diberi perlakuan berupa penambahan limbah industri. Limbah industri didapat dari Unit Pengolahan Limbah dari pabrik sendok logam milik PT *Star Metal Ware Industry* di Jakarta. Limbah tersebut memiliki kandungan Cu 754 mg kg^{-1} dan Zn $44,5 \text{ mg kg}^{-1}$ serta bertekstur liat dengan pH sebesar 7,30 (Salam dkk., 1998). Penambahan limbah industri berlogam berat pada tanah Ultisol yang memiliki pH rendah akan menyebabkan mobilitas logam berat tersebut di dalam tanah meningkat (Sintorini dkk., 2021). Tanah Ultisol yang memiliki pH rendah memiliki konsentrasi ion H^+ yang tinggi di larutan tanah. Hal tersebut sangat berbahaya karena ion H^+ memiliki kemampuan untuk berikatan lebih kuat dengan muatan negatif pada tanah sehingga dapat menggantikan sebagian besar kation lain pada kompleks jerapan tanah, termasuk kation logam berat. Adanya proses pergantian tersebut menyebabkan kation logam berat terlepas dari kompleks jerapan tanah dan tersedia di larutan tanah sehingga mencemari tanah (Alloway, 2005).

Pencemaran logam berat di dalam tanah harus diperbaiki seoptimal mungkin sehingga dampaknya tidak terlalu membahayakan makhluk hidup. Perbaikan tanah tercemar logam berat salah satunya dapat dilakukan dengan bantuan *biochar*. *Biochar* adalah arang yang diperoleh dari proses pirolisis yang merupakan hasil pemanasan bahan organik menggunakan suhu tinggi dengan kadar oksigen yang rendah, bahkan tanpa oksigen (Subarkhah dan Titah, 2023). *Biochar* ini sangat baik dalam membenahi tanah tercemar logam berat karena

biochar memiliki potensi dengan luas permukaan yang besar, morfologinya yang sangat porous, dan gugus fungsionalnya yang dapat mengurangi pergerakan ketersediaan logam berat. Selain itu, *biochar* juga merupakan suatu basa yang akan turut berkontribusi dalam stabilisasi logam berat (Hidayat, 2015).

Gugus kimia yang terdapat pada permukaan *biochar*, seperti hidroksil, karboksil, fenolik, dan lain-lain merupakan kelompok fungsional pada *biochar* yang dapat meningkatkan nilai b dan K. Adanya gugus fungsional tersebut dapat meningkatkan nilai b dan K karena *biochar* membentuk kompleks yang spesifik dengan ion logam berat melalui ikatan kovalen yang memiliki afinitas dan stabilitas yang tinggi sehingga mampu meningkatkan nilai b dan K *biochar* terhadap logam berat. Terlebih lagi, *biochar* juga memiliki luas permukaan yang besar yang merupakan tempat terjadinya gaya tarik-menarik elektrostatik antara *biochar* dan ion logam berat yang berlawanan muatan sehingga dapat meningkatkan nilai b dan K *biochar* terhadap logam berat (Wang dkk., 2022).

Bahan baku untuk pembuatan *biochar* dapat menggunakan limbah pertanian, salah satunya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Limbah TKKS memiliki kandungan selulosa yang tinggi sehingga dapat mengikat logam berat. Kandungan tersebut mampu mengikat logam berat karena memiliki gugus-gugus aktif seperti OH dan COOH. Oleh karena itu, penambahan *biochar* TKKS pada tanah tercemar logam berat dinilai mampu meningkatkan kapasitas jerap tanah terhadap Cu dan Zn sehingga Cu dan Zn tidak bergerak bebas di larutan tanah dan meracuni lingkungan (Ariyani dan Asmawit, 2017).

Selain dari itu, berdasarkan data dari BPS pada tahun 2021, produksi tanaman kelapa sawit di Lampung mengalami peningkatan yang cukup pesat, yaitu pada tahun 2020 produksi kelapa sawit di Lampung sebanyak 384 ribu ton dan meningkat pada tahun 2021 menjadi 420 ribu ton. Produksi kelapa sawit meningkat, tetapi pengelolaan limbahnya tidak optimal, dalam hal ini adalah TKKS. Hal tersebut karena dalam produksi kelapa sawit terdapat 23% dari total produksi kelapa sawit adalah berupa TKKS, tetapi hanya 10% TKKS yang telah dimanfaatkan dalam beberapa hal, seperti untuk bahan bakar boiler dan kompos.

Hal tersebut merupakan bukti bahwa limbah TKKS belum didayagunakan secara optimal. Limbah TKKS juga dapat dimanfaatkan untuk bahan baku pembenah tanah, seperti *biochar* (Dewanti, 2018).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah terjadi perubahan kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada tanah akibat perlakuan limbah industri 26 tahun yang lalu (S)?
2. Apakah terjadi perubahan kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat setelah pemberian *biochar* TKKS (B)?
3. Apakah terdapat korelasi antara *biochar* TKKS (B) dengan limbah industri (S) terhadap kapasitas dan energi jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah yang mempunyai riwayat tercemar logam berat (S)?

1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang penelitian yang ada maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari perubahan kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada tanah akibat perlakuan limbah industri 26 tahun yang lalu (S).
2. Mempelajari perubahan peningkatan kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada tanah yang memiliki riwayat tercemar logam berat setelah pemberian *biochar* TKKS berbagai dosis (B).
3. Mempelajari korelasi antara *biochar* TKKS (B) dengan tanah tercemar limbah industri (S) terhadap kapasitas dan energi jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah yang memiliki riwayat tercemar logam berat.

1.4 Kerangka Pemikiran

Pertumbuhan demografi, perubahan gaya hidup, urbanisasi, dan industrialisasi yang pesat menyebabkan jumlah limbah-limbah industri meningkat di kota-kota di negara berkembang. Hal tersebut menyebabkan pencemaran lingkungan, terutama pada negara berkembang dengan upaya penting menuju praktik pengelolaan dan pembuangan limbah yang maju belum dilakukan secara maksimal. Adapun, pada negara-negara maju, dengan meningkatnya pengaruh teknologi mengakibatkan semakin banyak limbah padat dan air limbah yang dihasilkan. Pembuangan limbah ini sudah menjadi ancaman lingkungan global yang serius yang mengakibatkan pencemaran logam berat dari hasil-hasil limbah berbagai macam industri (Nyiramigisha dkk., 2021).

Logam berat merupakan unsur-unsur dengan massa jenis atom yang relatif tinggi, yaitu $>6 \text{ g cm}^{-3}$ atau dengan berat jenis $>5 \text{ g cm}^{-3}$. Beberapa logam berat dibutuhkan oleh tanaman dan hewan dengan jumlah yang relatif sedikit, seperti Cu dan Zn, yang merupakan unsur hara mikro esensial untuk pertumbuhan tanaman. Logam berat ini akan beracun bagi makhluk hidup jika berada pada konsentrasi yang relatif tinggi dibandingkan dengan tingkat kritisnya (Salam dan Ginanjar, 2018). Berdasarkan World Health Organization (1996) dalam Ogundele dkk (2015), konsentrasi Cu dan Zn secara berturut-turut pada tanah tidak boleh melebihi 36 mg kg^{-1} dan 50 mg kg^{-1} . Jika konsentrasi logam berat tersebut tidak sesuai dengan titik kritisnya maka keberadaan logam berat dapat meracuni makhluk hidup.

Keberadaan logam berat di dalam tanah terdapat dalam empat bentuk, yaitu ion bebas, ion kompleks, ion terjerap, dan padatan mineral (Salam, 1997).

Ketersediaan logam berat di dalam tanah tersebut dapat dilihat dari nilai b dan K . Nilai b merupakan jumlah maksimum adsorbat (logam berat) yang dapat dimuat pada suatu adsorben (tanah) (Szulejko dan Kim, 2019). Nilai K adalah konstanta pengikat Langmuir yang menggambarkan interaksi antara adsorbat (logam berat) pada lapisan tunggal (*monolayer*) pertama dan permukaan padat (tanah) (Swenson dan Stadie, 2019). Nilai K yang besar menunjukkan adanya interaksi yang kuat antara adsorbat (logam berat) dan adsorben (tanah) sedangkan nilai K yang lebih

kecil menunjukkan interaksi yang lemah antara adsorbat dan adsorben (Anjum dkk., 2023).

Pada penelitian ini, menggunakan adsorben tanah Ultisol yang berada di Sidosari, Natar. Tanah Ultisol tersebut merupakan tanah model pada tahun 1998 yang diberi perlakuan berupa penambahan limbah industri. Limbah industri berasal dari Unit Pengolahan Limbah dari pabrik sendok logam milik PT *Star Metal Ware Industry* di Jakarta. Limbah tersebut memiliki kandungan Cu 754 mg kg^{-1} dan Zn $44,5 \text{ mg kg}^{-1}$ serta bertekstur liat dengan pH sebesar 7,30 (Salam dkk., 1998). Tanah Ultisol memiliki karakteristik kimia berupa pH, KTK, dan kandungan bahan organik yang rendah (Yuniarti dkk., 2023). Karakteristik tanah Ultisol tersebut sangat bertolak belakang dalam upaya peningkatan nilai b dan K karena karakteristik tanah Ultisol yang disebutkan sebelumnya merupakan sifat-sifat tanah yang penting terkait perilaku kapasitas jerap tanah terhadap logam berat (Yu dkk., 2023) dan (He dkk., 2020). Penambahan limbah industri yang mengandung Cu dan Zn pada dosis yang berbeda terbukti dapat menurunkan pH tanah.

Berdasarkan penelitian (Salam dkk., 2020), penambahan limbah industri dengan dosis 15 Mg ha^{-1} dan 60 Mg ha^{-1} mengakibatkan terjadinya penurunan nilai pH pada tanah. Penambahan limbah industri dengan dosis 15 Mg ha^{-1} , pH tanah sebesar 5,37 dan terjadi penurunan pH dengan peningkatan dosis limbah industri 60 Mg ha^{-1} menjadi 5,22. Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa peningkatan dosis pada limbah industri mampu menurunkan pH tanah yang merupakan salah satu sifat tanah yang penting dalam kapasitas adsorpsi logam berat di dalam tanah dan juga akan berimplikasi langsung dalam terjadinya penurunan nilai b dan K pada tanah (Huang dkk., 2014).

Pada umumnya, kemampuan menjerap logam berat berkorelasi positif dengan pH tanah yang menunjukkan bahwa semakin rendah nilai pH tanah maka semakin besar kemungkinan ion-ion logam berat berada dalam larutan tanah dan mencemari tanah (Zeng dkk., 2011 dalam Yu dkk., 2023). Penelitian dari (Huang dkk., 2014), menunjukkan bahwa peningkatan pH tanah dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi Cu dan Zn pada tanah dan sebaliknya. Hal tersebut karena peningkatan pH tanah dapat menyebabkan ionisasi H^+ dari berbagai gugus

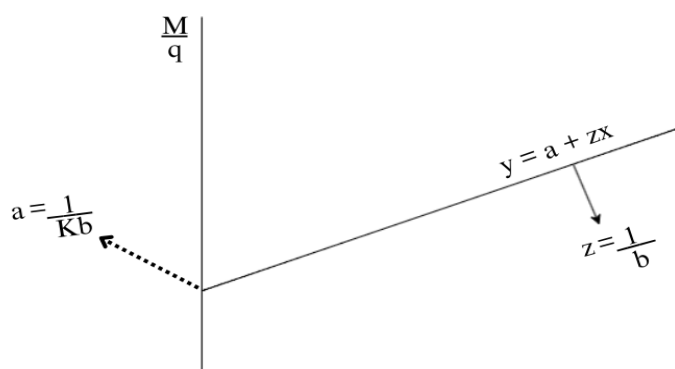
fungsional pada komponen tanah akan meningkat yang beriringan dengan meningkatnya daya jerap tanah terhadap kation logam berat (Salam, 1997). Ketersediaan logam berat di larutan tanah sangat berbahaya karena logam berat bersifat toksik (Boymau, 2023). Oleh karena itu, perlu dilakukan perbaikan terkait tanah tercemar logam berat sehingga dapat mengurangi ketersediaan dan pergerakannya di larutan tanah.

Perbaikan tanah tercemar logam berat dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya dapat melalui penambahan kompos ke dalam tanah yang tercemar logam berat. Penambahan kompos ini secara signifikan terbukti dapat menurunkan pergerakan logam berat di dalam tanah (Salam, 2000). Berdasarkan penelitian, kompos ke dalam tanah dapat meningkatkan aktivitas mikroba yang secara langsung juga dapat mempercepat proses pembusukan dari kompos itu sendiri sehingga kompos relatif cepat hilang dari sistem tanah (Xu dkk., 2023). Oleh karena itu, dibutuhkan inovasi perbaikan tanah tercemar logam berat yang tidak mudah hilang dari dalam sistem tanah. Inovasi tersebut dapat dilakukan dengan melalui penambahan *biochar* pada tanah tercemar logam berat. *Biochar* adalah arang yang diperoleh dari proses pirolisis yang merupakan pemanasan bahan organik menggunakan suhu tinggi dengan kadar oksigen yang rendah, bahkan tanpa oksigen (Subarkhah dan Titah, 2023).

Biochar akan sangat baik dalam hal membenahi tanah tercemar logam berat karena *biochar* memiliki potensi dengan luas permukaan yang besar, morfologinya yang sangat porous, dan gugus fungsionalnya yang dapat mengurangi pergerakan ketersediaan logam berat. Selain itu, *biochar* juga merupakan basa yang dapat turut berkontribusi dalam stabilisasi logam berat (Hidayat, 2015). Lebih lanjut lagi, pemberian *biochar* sebagai pembenah tanah pada tanah tercemar logam berat dapat menekan kelarutan logam berat, meningkatkan kadar bahan organik, dan meningkatkan air tersedia pada tanah (Wahyuni dkk., 2021). Adapun, TKKS memiliki kandungan selulosa yang tinggi sehingga dapat mengikat logam berat. Kandungan tersebut mampu mengikat logam berat karena memiliki gugus-gugus aktif seperti OH dan COOH. Menurut penelitian dari (Heryani dkk., 2018), pengaplikasian *biochar* TKKS ke tanah

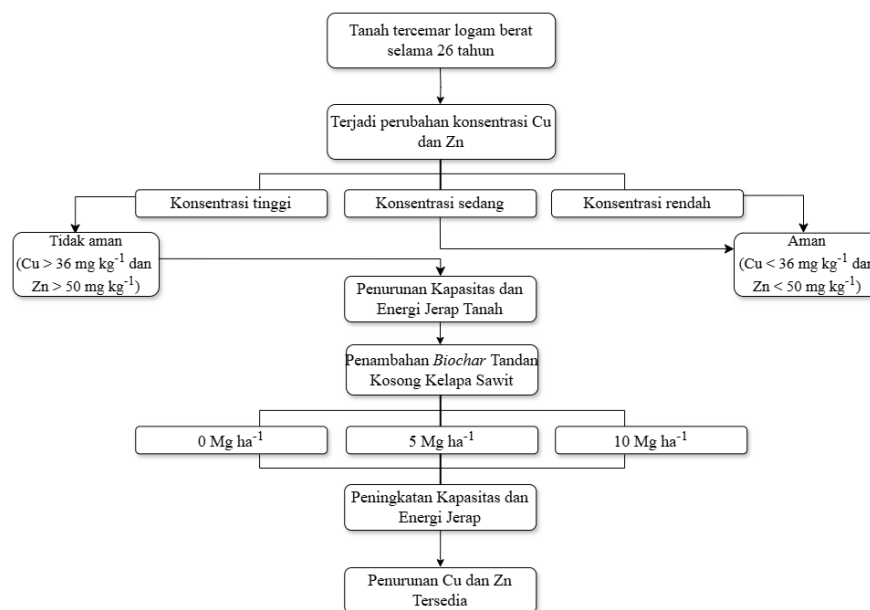
mampu meningkatkan pH dan KTK tanah yang cukup signifikan. Hal tersebut ditunjukkan melalui peningkatan pH tanah dari 5,23 menjadi 6,04 dan peningkatan KTK tanah dari 17,87 menjadi 29,04 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ setelah tanah diaplikasikan *biochar* TKKS. Hal tersebut tentu akan berimplikasi baik terhadap nilai b dan K karena pH dan KTK tanah merupakan sifat-sifat tanah yang penting terkait perilaku kapasitas jerap tanah terhadap logam berat (Yu dkk., 2023) dan (He dkk., 2020).

Secara spesifik, penelitian yang dilakukan oleh (Cao dkk., 2019) menunjukkan bahwa penambahan *biochar* pada tanah tercemar logam berat mampu meningkatkan jumlah adsorpsi maksimum ion logam atau kapasitas jerap tanah (b) dan juga mampu meningkatkan nilai konstanta kesetimbangan Langmuir yang berkaitan dengan kapasitas dan laju adsorpsi atau energi jerap tanah (K). Nilai b dan K pada persamaan Langmuir ini didapat berdasarkan intersep dan kemiringan (*slope*) plot indeks adsorpsi logam berat (M/q) atau nilai y terhadap konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (M) yang digambarkan pada Gambar 1. Adanya peningkatan nilai b dan K yang terjadi pada penelitian di atas cukup signifikan, yaitu nilai b pada tanah sebelum diaplikasikan *biochar* adalah 14,99 mg g^{-1} dan meningkat menjadi 30,03 mg g^{-1} . Nilai K juga mengalami peningkatan yang cukup signifikan, yaitu 0,02 pada tanah awal sebelum diaplikasikan *biochar* dan meningkat menjadi 0,07 setelah tanah diaplikasikan *biochar*. Oleh karena itu, penambahan *biochar* tandan kosong kelapa sawit pada tanah tercemar logam berat diduga mampu meningkatkan kapasitas jerap tanah sekaligus energi jerap tanah terhadap Cu dan Zn sehingga ketersediaan Cu dan Zn pada tanah mengalami penurunan (Ariyani dan Asmawit, 2017).



Gambar 1. Grafik persamaan isotermal Langmuir.

Penambahan bahan organik ataupun bahan pembenah tanah ke dalam tanah dengan dosis yang berbeda-beda dapat mempengaruhi respon yang berbeda pula. Hal ini ditunjukkan oleh penelitian yang dilakukan Salam dkk pada tahun 1997 yang menunjukkan bahwa pemberian kompos daun singkong pada tanah tercemar limbah industri dengan dosis (dalam ton ha⁻¹) 0, 5, 10, dan 20 memberikan respon terkait nilai pH tanah yang berbeda pula. Nilai pH merupakan salah satu sifat tanah yang penting dalam kapasitas adsorpsi logam berat di dalam tanah (Huang dkk., 2014). Semakin tinggi dosis kompos daun singkong yang diberikan maka semakin tinggi pula pH tanah. Namun, di antara perlakuan penambahan kompos daun singkong dosis 10 ton ha⁻¹ dengan penambahan kompos daun singkong dosis 20 ton ha⁻¹ tidak berbeda secara signifikan (Salam dkk., 1997). Adapun, hasil penelitian lain menunjukkan bahwa penambahan *biochar* dengan dosis 10 Mg ha⁻¹ lebih efektif dibandingkan *biochar* dengan dosis 5 Mg ha⁻¹ dalam menurunkan kadar ketersediaan logam berat di dalam tanah sehingga terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi terhadap Cu dan Zn (Salam, 2022). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pemberian *biochar* TKKS dengan dosis 10 Mg ha⁻¹ dapat meningkatkan kapasitas jerap tanah terbaik yang akan berimplikasi secara langsung juga terhadap energi jerap tanah. Fenomena di atas terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka pemikiran perubahan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat akibat perlakuan *biochar* tandan kosong kelapa sawit.

1.5 Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran di atas maka hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Terjadi penurunan kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri 26 tahun yang lalu (S).
2. Terjadi peningkatan kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada tanah yang memiliki riwayat tercemar logam berat (S) setelah pemberian *biochar* TKKS dengan dosis 10 Mg ha^{-1} (B₂).
3. Terdapat korelasi antara *biochar* TKKS (B) dengan tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri (S) terhadap kapasitas dan energi jerap tanah terhadap Cu dan Zn.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dampak Buruk Logam Berat dan Mitigasinya dengan *Biochar*

Secara alami, tanah mengandung logam berat yang sebagian dari logam berat tersebut, seperti Cu dan Zn, memiliki peran penting dalam proses fisiologi tanaman dengan jumlah yang relatif sedikit. Ketersediaannya yang tinggi dapat menyebabkan toksisitas pada tanaman yang tumbuh di atasnya (Winarmadani, 2019). Beberapa dampak buruk logam berat antara lain dapat menurunkan aktivitas dan populasi mikrobiota tanah, menurunkan kesuburan tanah, dan menurunkan hasil panen serta menyebabkan masuknya bahan beracun ke dalam rantai makanan makhluk hidup (Silva dkk., 2021).

Toksisitas logam berat ini juga berpengaruh sangat besar pada manusia karena dapat menurunkan tingkat energi dan merusak fungsi otak, paru-paru, ginjal, hati, komposisi darah, dan organ penting lainnya. Lebih lanjut lagi, paparan logam berat dalam jangka yang lebih panjang dapat menyebabkan proses degeneratif fisik, otot, dan neurologis yang berkembang secara bertahap menyerupai penyakit Parkinson, penyakit Alzheimer, dan distrofi otot. Terpapar logam berat berulang kali dalam jangka panjang bahkan dapat menyebabkan kanker (Jaishankar dkk., 2014). Logam berat dapat memengaruhi kesehatan manusia karena logam berat dapat memanipulasi sistem kekebalan tubuh untuk meningkatkan respon imun yang tidak tepat (Anka dkk., 2022).

Adapun, dampak buruk logam berat, seperti Cu lebih lanjut terhadap kesehatan manusia, yaitu mutasi dan agregasi protein mitokondria yang dapat menyebabkan penurunan aktivitas enzim antioksidan utama dan peningkatan produksi spesies

oksigen reaktif atau *reactive oxygen species* yang beracun (Kahlson dan Dixon, 2022). Dampak buruk Cu bagi kesehatan manusia juga dapat menyebabkan fibrosis dalam jaringan ginjal (Niu dkk., 2020), penurunan fungsi reproduksi pada pria (Tvrda dkk., 2014), obesitas (Yang dkk., 2019), dan juga dapat mengakibatkan gangguan neurodegeneratif karena pemeliharaan homeostatis unsur-unsur penting (Ca, Fe, dan Mn) yang berkaitan dengan induksi stress oksidatif terganggu (Witt dkk., 2021). Selain itu, logam berat juga memiliki potensi untuk masuk ke dalam air tanah yang selanjutnya akan diserap oleh tumbuhan dan masuk ke dalam rantai makanan makhluk hidup yang pada akhirnya akan memberikan dampak buruk bagi kesehatan makhluk hidup (Chen dkk., 2018).

Terlebih dari itu, sektor pertanian yang secara intensif menggunakan pupuk kimia dan pestisida telah terbukti meningkatkan kemungkinan tanah terkontaminasi oleh logam berat yang selanjutnya dapat terakumulasi dalam jaringan tanaman yang dibudidayakan (Kladsomboon dkk., 2019). Lebih lanjut lagi, konsentrasi logam berat yang tinggi di dalam tanah dapat berdampak buruk bagi perkembangan, pertumbuhan, dan fiksasi nitrogen oleh tanaman legum (Mondal dkk., 2015). Tanah dengan konsentrasi logam berat yang tinggi saat terjadi proses pelindian juga menyebabkan logam berat yang ada di dalam tanah tersebut akan mencemari air permukaan dan air tanah sehingga memperburuk pencemaran air dan berdampak buruk pada organisme akuatik (Wang dan Lei, 2018).

Oleh karena itu, logam berat di dalam tanah perlu diatasi, salah satunya adalah dengan penggunaan *biochar*. *Biochar* akan menjerap polutan seperti logam berat karena permukaannya yang berpori. *Biochar* juga berperan dalam peningkatan kapasitas adsorpsi tanah karena porositas *biochar* mampu meningkatkan retensi tanah pada kation logam berat di dalam tanah yang diberi perlakuan *biochar* (Salam, 2022). Selain permukaannya yang berpori, *biochar* juga memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan kandungan bahan organiknya tinggi sehingga mampu meningkatkan pH tanah secara optimal yang nantinya dapat mempengaruhi peningkatan kapasitas tukar kation tanah dan kelarutan logam berat di dalam tanah (Luo, 2019). Inovasi penggunaan *biochar* pada tanah

tercemar logam berat merupakan langkah yang tepat karena berdasarkan penelitian terdahulu, *biochar* mampu menurunkan konsentrasi Cu dan Zn di dalam tanah serta berimplikasi baik terhadap tanaman yang ditanam di atasnya, yaitu mampu mengoptimalkan tinggi dan berat kering tanaman jagung (Salam dkk., 2021).

2.2 Limbah Sawit di Indonesia

Salah satu jenis *biochar* yang dapat digunakan adalah *biochar* berbasis tandan kosong kelapa sawit. Kelapa sawit merupakan salah satu industri penyumbang devisa bagi negara dari sektor non-migas yang strategis. Kegiatan ekspor kelapa sawit yang terus meningkat ini menimbulkan masalah di pabrik sawit itu sendiri. Terdapat peningkatan volume limbah kelapa sawit, baik limbah padat, cair, maupun gas. Limbah TKKS merupakan limbah terbesar dalam pengolahan tandan buah segar kelapa sawit. Dapat dikatakan demikian karena dalam pengolahan 1 ton tandan buah segar kelapa sawit akan menghasilkan limbah berupa TKKS sebanyak 23% atau 230 kg, limbah cangkang sebanyak 6,5% atau 65 kg, lumpur sawit sebanyak 4% atau 40 kg, serabut sebanyak 13% atau 130 kg, dan limbah cair sebanyak 50%. Limbah padat berupa TKKS ini akan menimbulkan permasalahan lingkungan bagi industri dan pada akhirnya akan mengurangi daya saing dan produktivitas industri sawit Indonesia (Susanto dkk., 2017). Pengolahan TKKS oleh pabrik kelapa sawit masih sangat terbatas karena sebagian besar pabrik kelapa sawit di Indonesia masih membakar TKKS walaupun pembakaran ini sudah dilarang oleh pemerintah (Salmina, 2016).

Lebih lanjut lagi, ketersediaan kelapa sawit di Indonesia sangat melimpah. Dikatakan demikian karena menurut data dari BPS pada tahun 2021, produksi kelapa sawit di Indonesia mencapai 420 ribu ton. Hal tersebut tentu akan mempengaruhi dalam penyediaan bahan baku *biochar* TKKS dalam penelitian ini karena ketersediaan kelapa sawit yang melimpah tersebut akan berimplikasi terhadap biaya yang perlu dikeluarkan untuk penyediaan *biochar* TKKS tidak terlalu tinggi. *Biochar* juga dinilai sebagai adsorben yang efisien dalam penanganan logam berat karena memiliki struktur berpori sehingga

memungkinkan *biochar* untuk dapat menyerap berbagai jenis polutan dengan efisiensi yang tinggi (Savitri dkk., 2022). *Biochar* juga dapat digunakan dalam berbagai aplikasi proses, mudah ditangani, dan kemungkinan untuk meregenerasi adsorben yang telah digunakan yang merupakan proses penting dalam memastikan efisiensi dan keberlanjutan penggunaan adsorben dalam berbagai aplikasi (Daramola dan Ayeni (ed.), 2020).

2.3 Kapasitas Jerap Tanah terhadap Logam Berat

Kapasitas jerap pada tanah terhadap logam berat dapat ditunjukkan oleh parameter Kapasitas Tukar Kation (KTK) (Salam, 2020). KTK tanah adalah kemampuan fase padat tanah untuk menarik atau menyimpan dan menukar unsur hara kation dengan larutan tanah dan tersedia bagi tanaman melalui reaksi pertukaran (Bedassa, 2022). Jerapan tanah terhadap kation akan bergantung kepada valensi kation yang bersangkutan. Semakin tinggi valensi kation maka semakin tinggi pula jerapannya (Nursyamsi dkk., 2009). KTK pada tanah ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu pH tanah, tekstur, jenis dan kadar mineral liat silikat, dan kadar humus (Utomo, 2016). Adapun tingkat kapasitas jerap atau adsorpsi tanah dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu pH tanah, bahan organik terlarut, kekuatan, dan jumlah logam yang berbeda. Partikel mineral dan koloid organik dari fase padat adalah komponen tanah yang paling aktif dalam proses adsorpsi. Namun, heterogenitas dan variabilitasnya yang tinggi antartanah membuat peran pastinya selama adsorpsi logam berat masih belum dipahami dengan jelas. Kapasitas adsorpsi tanah umumnya dipelajari melalui kondisi eksperimental yang dirancang untuk mencapai keseimbangan antara fase padatan tanah dan fase larutan tanah, memberikan informasi tentang afinitas tanah, dan potensi mobilitas logam yang bersangkutan. Dengan demikian, kapasitas jerap tanah ini sangat perlu untuk dapat ditingkatkan, misalnya melalui penambahan *biochar* ke dalam tanah karena potensinya dalam menjerap kation-kation di dalam tanah, termasuk kation logam berat yang bersifat toksik dan akan berimplikasi secara langsung terhadap mobilitas dari logam berat di dalam tanah (Cora dkk., 2020).

Biochar memiliki luas permukaan yang besar dan kapasitas yang tinggi untuk menjerap logam berat. Hal tersebut akan berpengaruh sangat baik karena kelarutan logam berat di dalam tanah dapat berkurang melalui proses adsorpsi (Park., 2011). *Biochar* memiliki kandungan senyawa karbon yang stabil dengan struktur karbon aromatik yang dominan. Hal tersebut menjadikan hanya sebagian kecil dari *biochar* yang akan termineralisasi dalam waktu yang singkat (Purakayastha dkk., 2015).

Terdapat 4 mekanisme penjerapan logam oleh *biochar*, yaitu pertukaran ion dan adsorpsi fungsi kationik π , kopresipitasi, kompleksasi, dan penjerapan elektrostatik. Pertukaran ion dan adsorpsi fungsi kationik π merupakan salah satu alasan penting penurunan aktivitas logam berat. Semakin besar jumlah pertukaran kation maka semakin kuat retensi logam berat. Lalu, dengan kopresipitasi *biochar* dapat secara efektif mengurangi aktivitas logam berat melalui adsorpsi dan pelarutan-pengendapan mineral penyusunnya (Rees dkk., 2013). Adapun, kompleksasi bersifat penting untuk fiksasi ion logam berat dengan afinitas kuat (Li dkk., 2017). Terakhir, ada penjerapan elektrostatik dengan luas permukaan yang lebih besar dan energi permukaan yang lebih tinggi dapat membantu *biochar* dalam menjerap polutan logam berat dengan kuat dan menghilangkannya dari tanah (Wang dkk., 2018).

2.4 Kapasitas Jerap Ditunjukkan oleh Kapasitas Adsorpsi Maksimum dan Konstanta Energi Adsorpsi dalam Persamaan Isotermal Langmuir

Kapasitas adsorpsi maksimum dan energi adsorpsi dapat dipahami dengan Isotermik Langmuir. Isotermik Langmuir adalah model yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara konsentrasi zat terlarut dalam fase gas atau cair dengan konsentrasi zat terlarut yang diadsorpsi pada permukaan padat. Dalam persamaan ini, b menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum yang merupakan jumlah maksimum zat yang dapat diadsorpsi pada permukaan dan K adalah konstanta energi adsorpsi yang mencerminkan kekuatan ikatan antara zat terlarut dan permukaan. Oleh karena itu, b dan K dalam persamaan Langmuir dapat digunakan untuk menggambarkan penjerapan kation logam berat oleh tanah.

Kapasitas jerap tanah dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti komposisi mineral, kandungan bahan organik, pH, dan kapasitas tukar kation pada tanah (Wang dkk., 2022).

2.5 Deskripsi Penjerapan Logam Berat dengan Menggunakan Persamaan Langmuir Isotermik

Persamaan Langmuir dengan ekspresi $\frac{M}{q} = \frac{1}{Kb} + \frac{1}{b}M$ dapat digunakan untuk meneliti penjerapan logam berat. $\frac{M}{q}$ merupakan indeks adsorpsi logam berat, dengan M merupakan konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (mg L^{-1}), K merupakan konstanta energi adsorpsi, b merupakan kapasitas adsorpsi maksimum (mg kg^{-1}), dan q merupakan total logam berat teradsorpsi (mg kg^{-1}) yang menyatakan selisih antara konsentrasi logam berat awal dengan logam berat kesetimbangan (M) (Salam, 2023). Dengan nilai b dan K sejumlah tanah dan logam berat memungkinkan dilakukannya perbandingan kapasitas adsorpsi antartanah dan antarperlakuan serta kekuatan adsorpsi berbagai kation logam berat (Salam, 2017). Isoterm adsorpsi ini memberikan gambaran hubungan kesetimbangan antara partikel yang terjerap dengan penjerapannya dan juga merupakan gambaran dalam keadaan setimbang antara jumlah dengan konsentrasi zat terlarut yang terjerap pada permukaan padatan pada suhu tetap (Amanda dkk., 2021).

Pada persamaan Langmuir digunakan pendekatan kinetika saat kecepatan proses kesetimbangan terjadi, yaitu pada saat kecepatan adsorpsi sama dengan desorpsi. Asumsi yang digunakan pada persamaan ini adalah bahwa lapisan molekul yang teradsorpsi akan membentuk satu lapisan tunggal; mekanisme *chemisorption* lebih utama; tidak ada interaksi di antara molekul-molekul adsorbat; permukaan padatan bersifat homogen dan afinitas setiap lokasi untuk molekul adsorbat sama; dan adsorbat teradsorpsi pada tempat yang sudah tertentu dan tidak dapat bergerak pada permukaan padatan (Yustinah dkk., 2019).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei s.d. November 2024. Contoh tanah diambil dari petak percobaan dengan perlakuan limbah industri berlogam berat yang terletak di Sidosari, Kecamatan Natar, Lampung Selatan. Percobaan dilakukan di Rumah Plastik Perguruan Tinggi Al-Madani (PTAM), Kota Bandar Lampung. Analisis tanah dilakukan di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah ayakan tanah, sentrifugator merek Hermle dengan seri tipe Z366, botol sentrifugasi, botol film, labu erlenmeyer, gelas beaker, gelas ukur, kantung plastik, pot, kertas label, kertas saring Whatman, labu ukur, pH meter, neraca analitik, *shaker*, *Flame Atomic Absorption Spectrophotometry (Flame AAS)* merek Shimadzu dengan seri tipe AA-7000 (di UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung) dan Thermo Scientific dengan seri tipe iCE 3000 (di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung), buret, labu destilasi, kompor gas, tisu, tabung sedimentasi, mesin pengaduk (*mixer*), hidrometer, termometer, dan perangkat lunak Microsoft Excel.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah aquades, *biochar* TKKS, contoh tanah tercemar logam berat dari Sidosari, larutan induk logam

berat Cu dan Zn 1000 ppm, larutan stok logam berat Cu dan Zn 100 ppm, larutan standar logam berat, kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$), asam sulfat (H_2SO_4), asam fosfat (H_3PO_4), NaF 4%, indikator difenilamin, larutan ammonium ferrosulfat, asam asetat 1 N pH 7 (NH_4OAc), asam asetat 0,01 N pH 7 (NH_4OAc), alkohol 96%, NaCl 10% pH 3, NaOH 40%, asam borat 1,5%, HCl 1 N, HCl 0,1 N, Na-hexametafosfat, dan Na-karbonat.

3.3 Metode

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) 2 faktor. Faktor pertama, yaitu tanah dengan riwayat perlakuan dosis limbah industri berlogam berat yang terdiri dari tanah Sidosari takaran total 0 Mg ha^{-1} (S_0) atau tanpa limbah industri (kontrol), tanah Sidosari tercemar limbah berlogam berat takaran 15 Mg ha^{-1} (S_1) atau konsentrasi rendah, dan tanah Sidosari tercemar limbah berlogam berat takaran 60 Mg ha^{-1} (S_2) atau konsentrasi tinggi. Contoh tanah diambil dari petak percobaan dengan perlakuan limbah industri berlogam berat 0 Mg ha^{-1} (L_0), 15 Mg ha^{-1} (L_1), dan 60 Mg ha^{-1} (L_2) tanpa perlakuan kapur dan kompos. Faktor kedua, yaitu *biochar* berbahan TKKS (B) dengan dosis 0 Mg ha^{-1} (B_0), dosis 5 Mg ha^{-1} (B_1), dan dosis 10 Mg ha^{-1} (B_2). Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali, yaitu U_1 , U_2 , dan U_3 sehingga terdapat $3 \times 3 \times 3 = 27$ satuan percobaan (Gambar 3).

$S_0B_2U_2$	$S_2B_2U_3$	$S_1B_1U_2$
$S_1B_0U_2$	$S_0B_1U_3$	$S_2B_1U_1$
$S_2B_0U_3$	$S_1B_0U_3$	$S_1B_1U_1$
$S_2B_2U_2$	$S_0B_0U_1$	$S_2B_0U_2$
$S_0B_1U_2$	$S_0B_0U_3$	$S_2B_0U_1$
$S_1B_2U_2$	$S_0B_2U_1$	$S_2B_2U_1$
$S_0B_2U_3$	$S_0B_1U_1$	$S_2B_1U_2$
$S_2B_1U_3$	$S_1B_2U_3$	$S_1B_2U_1$
$S_0B_0U_2$	$S_1B_1U_3$	$S_1B_0U_1$

Gambar 3. Tata letak satuan percobaan dalam Rancangan Acak Lengkap (RAL).

Tabel 1. Contoh tanah yang diambil dari lahan percobaan Sidosari.

Contoh Tanah	Perlakuan (Gambar 4)	Ulangan	Perlakuan		
			Limbah	Bahan Organik	Kapur
		Mg ha ⁻¹		
S ₀	L ₀ B ₀ K ₀	1	0	0	0
	L ₀ B ₀ K ₀	2	0	0	0
	L ₀ B ₀ K ₀	3	0	0	0
S ₁	L ₁ B ₀ K ₀	1	15	0	0
	L ₁ B ₀ K ₀	2	15	0	0
	L ₁ B ₀ K ₀	3	15	0	0
S ₂	L ₂ B ₀ K ₀	1	60	0	0
	L ₂ B ₀ K ₀	2	60	0	0
	L ₂ B ₀ K ₀	3	60	0	0

Keterangan: S₀= contoh tanah tanpa perlakuan limbah industri; S₁= contoh tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri 15 Mg ha⁻¹; S₂= contoh tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri 60 Mg ha⁻¹; L₀= tanah tanpa perlakuan limbah industri (limbah industri 0 Mg ha⁻¹) pada petak percobaan tahun 1998; L₁= tanah berlogam berat konsentrasi rendah (limbah industri 15 Mg ha⁻¹) pada petak percobaan tahun 1998; L₂= tanah berlogam berat konsentrasi tinggi (limbah industri 60 Mg ha⁻¹) pada petak percobaan tahun 1998; B₀= kompos daun singkong 0 Mg ha⁻¹ pada petak percobaan tahun 1998; K₀= kapur 0 Mg ha⁻¹ pada petak percobaan tahun 1998.

3.4.2 Penyiapan *Biochar*

Tandan besar dari TKKS untuk dapat dijadikan *biochar* dihancurkan terlebih dahulu. Penghancuran dilakukan hingga tandan besar tersebut menjadi serabut. Hal tersebut bertujuan agar *biochar* yang dihasilkan dapat maksimal (Febriyanti dkk., 2019). Pembuatan *biochar* TKKS dapat dilakukan secara tradisional dengan menggunakan gulungan kawat kasa yang lubangnya berukuran kecil, seperti 0,5 cm x 0,5 cm atau 1 cm x 1 cm yang digulung membentuk lingkaran dengan diameter 20-30 cm. TKKS yang sudah dihancurkan menjadi serabut diletakkan di sekeliling gulungan kawat kasa sehingga kawat kasa yang berbentuk cerobong berada di tengah-tengah timbunan TKKS.

Proses pembakaran dilakukan dengan memasukkan bahan-bahan yang mudah terbakar, seperti daun kering, kayu kering, atau bambu kering ke dalam cerobong kawat kasa. Proses pembakaran ini berlangsung hingga seluruh permukaan TKKS terlihat menghitam. Setelah itu, dilakukan penyiraman tumpukan TKKS dengan air untuk mematikan bara api. Langkah terakhir yang dilakukan dalam penyiapan

biochar TKKS ini adalah mengeringkan *biochar* TKKS yang telah matang dengan cara menjemur dan mengayak atau menggiling *biochar* sebelum digunakan (Nurida dkk., 2015).

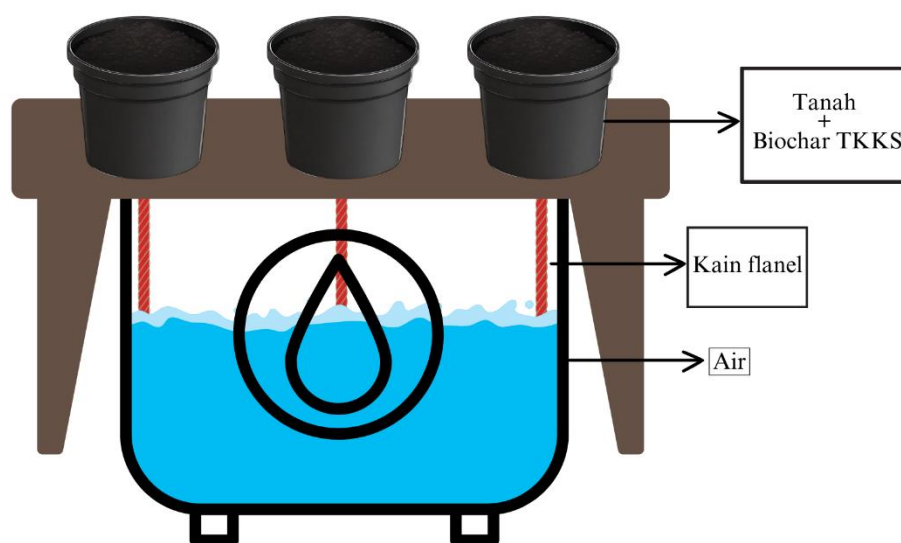
3.4.3 Pelaksanaan Percobaan

Contoh tanah S₀, S₁, dan S₂ 200 g berat kering oven (BKO) (105⁰C 24 jam) dicampur rata dengan *biochar* sesuai dengan kombinasi perlakuan di atas lembar plastik bersih (Gambar 3) dimasukkan ke dalam pot plastik bersih. Penambahan *biochar* pada tanah dilakukan sesuai dengan konversi dosis dari ton ha⁻¹ ke dosis *biochar* yang dibutuhkan di dalam 200 g tanah dalam setiap pot (Tabel 2).

Tabel 2. Dosis *biochar* setiap perlakuan.

Dosis <i>Biochar</i> ton ha ⁻¹ (ton ha ⁻¹)	Dosis <i>Biochar</i> 200 g tanah BKO (g pot ⁻¹)
0	0
5	0,5
10	1

Pencampuran tanah dan *biochar* untuk setiap perlakuan dilakukan dengan cara menyebarkan tanah di atas lembaran plastik bersih. Sebaran tanah di atas lembaran plastik bersih tersebut kemudian ditambahkan *biochar* sesuai perlakuan dan dihomogenkan dengan cara menarik setiap ujung lembaran plastik ke bagian tengah secara berulang hingga warna hitam dari *biochar* menghilang. Hal tersebut menandakan bahwa campuran tanah dan *biochar* telah homogen. Campuran tanah dan *biochar* setiap perlakuan kemudian diinkubasi pada kadar air kapasitas lapang yang diatur secara kapiler (Gambar 5). Contoh tanah dipanen setelah 4 pekan untuk selanjutnya digunakan dalam penelitian penentuan nilai b dan K.



Gambar 5. Inkubasi kombinasi perlakuan secara kapiler.

3.5 Peubah Pengamatan

3.5.1 Peubah Utama

Peubah utama (Tabel 3) pada penelitian ini adalah nilai b , yaitu kapasitas adsorpsi maksimum dan nilai K , yaitu konstanta energi adsorpsi. Nilai b dan K ini merupakan komponen yang ada di dalam model atau persamaan Langmuir. Model atau persamaan Langmuir ini digunakan untuk sejumlah kecil adsorbat ketika larutan kesetimbangan yang lebih encer digunakan (Orhue dan Emomu, 2022).

3.5.2 Peubah Pendukung

Peubah pendukung pada penelitian ini (Tabel 3.) adalah Cu dan Zn tersedia, KTK, pH tanah, C-organik, dan kadar liat. Penetapan Cu dan Zn tersedia dilakukan dengan menggunakan pengestrak $1\ N\ HNO_3$. Penetapan kapasitas tukar kation pada sampel tanah dilakukan dengan metode pencucian dengan Ammonium Asetat $1\ N\ pH\ 7$ (Suryani, 2014). Penetapan pH tanah dilakukan dengan metode elektrode pH meter (Tan, 2005). Penetapan C-organik pada tanah dilakukan dengan metode Walkley-Black yang melibatkan oksidasi karbon organik dan kalium dikromat dalam lingkungan asam, karbon dioksida yang dihasilkan diukur dan digunakan untuk menghitung kandungan karbon organik (Walkley dan Black,

1934). Penetapan kadar liat pada tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri dilakukan dengan metode hidrometer bouyocos menggunakan larutan dispersi untuk memisahkan fraksi tanah menjadi tunggal (Afandi 2019).

Tabel 3. Peubah dan metode analisis yang digunakan.

Parameter	Metode Analisis
Nilai b dan K	Isotermal Langmuir
Cu dan Zn tersedia	Pengekstrak 1 N HNO ₃ , AAS
KTK	Pencucian dengan Ammonium Asetat 1 N pH 7
pH tanah	Elektrode pH
C-organik	Walkley-Black
Kadar liat	Hidrometer

3.6 Analisis Data

Data b dan K antarperlakuan dibandingkan berbasis nilai *Standard Error of the Mean* (SEM). Uji korelasi untuk melihat hubungan b dan K dengan baik dalam *simple* ataupun *multiple linear regression* juga dilakukan.

3.7 Penetapan Nilai b dan K dengan Isotermal Langmuir

3.7.1 Percobaan Laboratorium untuk Menentukan Persamaan Langmuir

Percobaan laboratorium untuk menentukan persamaan Langmuir terdapat beberapa langkah yang harus dilakukan. Langkah pertama yang dilakukan adalah memasukkan contoh tanah sebanyak 2 g setara BKO ke dalam botol sentrifugasi atau botol *film*. Selanjutnya, ditambahkan larutan logam berat (Cu atau Zn) dengan seri konsentrasi 0, 5, 10, 15, dan 20 ppm. Setelah penambahan larutan logam berat, campuran tanah dan larutan logam berat dikocok dengan *end to end shaker* selama 2 jam. Seusai pengocokan, campuran tanah-logam berat disaring menggunakan kertas Whattman. Konsentrasi logam berat dalam supernatan (M) ditentukan dengan *flame* AAS dan persamaan Langmuir ditetapkan dengan

menggunakan aplikasi Excel untuk selanjutnya dapat dilakukan penghitungan nilai b dan K.

3.7.2 Penentuan Konsentrasi Kesetimbangan M dalam ppm atau mg L^{-1}

Penentuan konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan akan dilakukan dalam beberapa langkah, yaitu:

- Pembuatan stok larutan standar untuk percobaan (misal 100 ppm Cu atau 100 ppm Zn)

Pembuatan stok larutan standar untuk percobaan ini dilakukan dengan memasukkan 100 mL air murni ke dalam labu volumetrik 1000 mL. Lalu, ditambahkan 100 mL larutan standar Cu atau larutan standar Zn. Lalu, rapatkan ke tanda tera dengan air murni, homogenkan, dan masukkan ke botol 1000 mL sampai digunakan.

- Penentuan nilai b dan K setiap satuan percobaan

Penentuan nilai b dan K setiap satuan percobaan dilakukan dengan menimbang 2 g contoh tanah ke masing-masing botol pengocok ukuran 25 mL dan berat tanah dikonversi sesuai kadar air.

Lalu, setelah dimasukkan 2 g contoh tanah ke dalam masing-masing botol pengocok maka ditambahkan larutan standar Cu dan Zn 100 ppm serta air murni hingga mencapai volume total 20 mL yang mana digambarkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Pencampuran contoh tanah dengan larutan logam.

Berat Tanah (g BKO)	Konsentrasi Awal Cu dan Zn (C) (ppm)	Larutan Standar Cu dan Zn 100 ppm (mL)	Air Murni (mL)	Total Volume (mL)
2	0	0	20	20
2	5	1	19	20
2	10	2	18	20
2	15	3	17	20
2	20	4	16	20

Setelah itu, campuran tanah dan larutan (Tabel 4) dikocok dengan *end to end shaker* selama 2 jam. Setelah pengocokan, campuran tanah dan larutan didiamkan selama beberapa saat untuk selanjutnya dilakukan pemisahan fraksi cair dengan penyaringan menggunakan kertas Whattman. Lalu, dapat dilakukan penentuan konsentrasi logam berat terkait dalam supernatan (M dalam ppm) menggunakan *flame AAS*. Pengukuran terus dilakukan hingga selesai (27 satuan percobaan) dengan langkah yang sama. Setelah, semua satuan percobaan memiliki nilai M dari *flame AAS* maka dapat dilakukan penentuan nilai b dan K dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel.

Pada perangkat lunak Microsoft Excel, nilai b dan K dapat diperoleh dalam beberapa langkah menggunakan formula-formula tertentu. Pada tahap pertama, dimasukkan nilai konsentrasi awal Cu dan Zn dalam ppm yang disimbolkan dengan C dan nilai supernatan (M) atau konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (mg L^{-1}) yang didapat dari pengukuran menggunakan *flame AAS*. Nilai M pada penentuan nilai b dan K ini digunakan untuk nilai x yang digunakan untuk mendapatkan persamaan Langmuir. Setelah itu, dicari nilai total logam berat teradsorpsi dalam mg L^{-1} yang disimbolkan dengan q_1 dan didapat dari formula pengurangan antara nilai C dan X. Lalu, dicari nilai total logam berat teradsorpsi dalam mg kg^{-1} yang disimbolkan dengan q dan didapat dari formula perkalian antara 10 dan q_1 . Setelah itu, dicari nilai y dengan formula pembagian antara nilai M dan q. Dilakukan dengan cara yang sama untuk konsentrasi awal (0, 5, 10, 15, dan 20 ppm) dari seluruh satuan percobaan hingga setiap konsentrasi awal dari seluruh satuan percobaan memiliki nilai x dan y. Nilai x dan y dari setiap satuan percobaan tersebut dapat memberikan persamaan Langmuir yang digambarkan sebagai persamaan garis linear $y = a + zx$ sehingga diperoleh 27 persamaan Langmuir.

Dengan persamaan Langmuir yang telah didapat untuk setiap satuan percobaan, dilakukan penghitungan lebih lanjut hingga memperoleh nilai b dan K. Berdasarkan persamaan Langmuir $y = a + zx$, nilai z yang menggambarkan kemiringan atau *slope* dan nilai a pada persamaan tersebut menggambarkan intersep. Nilai b dapat diperoleh dengan menggunakan formula $b = 1/z$, sedangkan

nilai K diperoleh dengan menggunakan formula $K = 1/ab$. Terakhir, setelah nilai b dan K dari setiap satuan percobaan diperoleh maka nilai b dan K tersebut dimasukkan ke dalam tabel penyajian data dan dilakukan analisis statistika untuk melihat nilai perbedaan dari setiap satuan percobaan dengan menggunakan uji lanjut perbandingan berbasis nilai *Standard Error of the Mean* (SEM).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Terjadi penurunan nilai kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan peningkatan nilai konstanta energi jerap (K) Cu 26 tahun setelah perlakuan limbah industri (S).
2. Nilai b_{Cu} menurun pada dosis B_1 dan meningkat pada dosis B_2 , sedangkan nilai K_{Cu} meningkat pada dosis B_1 dan menurun pada dosis B_2 walaupun hanya berbeda pada tanah dengan tingkat logam berat kontrol. Adapun, perlakuan *biochar* tidak berpengaruh terhadap ketersediaan Cu dan Zn dan kadar liat tanah, namun meningkatkan pH dan C-organik tanah dan cenderung menurunkan nilai KTK pada tanah.
3. Kapasitas jerap maksimum tanah terhadap Cu (b_{Cu}) berkorelasi negatif dengan ketersediaan Cu dan Zn, pH, dan C-organik dan berkorelasi positif dengan kadar liat. Konstanta energi jerap terhadap Cu (K_{Cu}) berkorelasi negatif dengan kadar liat dan berkorelasi positif dengan ketersediaan Cu dan Zn, pH, dan C-organik.
4. Kapasitas adsorpsi maksimum terhadap Cu (b_{Cu}) berbanding lurus dengan Zn tersedia, pH, kadar liat, dan KTK, namun terbalik dengan Cu tersedia dan C-organik. Konstanta energi jerapan terhadap Cu (K_{Cu}) berbanding lurus dengan Cu tersedia, C-organik, dan KTK dan terbalik dengan Zn tersedia, pH, dan kadar liat.
5. Nilai kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan nilai konstanta energi jerap (K) Zn tidak dapat ditentukan karena adsorpsi Zn tidak dapat digambarkan dengan baik menggunakan isoterma Langmuir.

5.2 Saran

Beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan analisis awal *biochar* sebelum diaplikasikan pada tanah untuk lebih mendalami dinamika nilai b dan K terhadap Cu di tanah tercemar logam berat.
2. Perlu dilakukan inkubasi *biochar* terhadap tanah dalam jangka waktu yang lebih panjang untuk dapat melihat reaksi *biochar* dalam jangka panjang terhadap sifat-sifat tanah.
3. Perlu dilakukan penelitian lanjutan terkait nilai b dan K terhadap Zn di tanah tercemar logam berat menggunakan pendekatan isotherm lainnya, seperti isotherm freundlich yang tidak memiliki asumsi ketat mengenai mekanisme adsorpsi dan juga lebih cocok untuk sistem yang heterogen.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi. 2019. *Metode Analisis Fisika Tanah*. Universitas Lampung. Bandar Lampung. 89 hlm.
- Afriyani, N.A., Durotussyifa, N., Nisa, U., Novpriansyah, H., Niswati, A., Sarno., dan Salam, A.K. 2024. The *Biochar*-Enhanced Phytoextraction of Heavy-MetalPolluted Tropical Soils by Thorny Amaranth (*Amaranthus spinosus*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1362(012009): 1-10.
- Alloway, B.J. 2005. *Essentials of Medical Geology: Chapter 14 Bioavailability of Elements in Soil*. Springer Science & Business Media. Dordrecht. 26 hlm.
- Amanda, D., Arfi, F., dan Nisah, K. 2021. Uji Persamaan Langmuir dan Freundlich pada Penyerapan Ion Logam Kobalt (II) oleh Kitosan dari Kulit Udang Windu (*Penaeus monodon*). *Amina*. 3(3): 123-135.
- Andrio, D., Saputra, M.R., dan Darmayanti, L. 2024. Utilization of Magnetic *Biochar* from Palm Shell as An Adsorbent for Removal of COD, Total Suspended Solid, Oil and Grease in Greywater. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. 10(3): 1195-1204.
- Anjum, A., Mazari, S.A., Hashmi, Z., Jatoi, A.S., Abro, R., Bhutto, A.W., Mubarak, N.M., Dehghani, M.H., Karri, R.R., Mahvi, A.H., dan Nasser, S. 2023. A Review of Novel Green Adsorbents as a Sustainable Alternative for the Remediation of Chromium (VI) from Water Environments. *Heliyon*. 9(e15575): 1-55.
- Anka, A.U., Usman, A.B., Kaoje, A.N., Kabir, R.M., Bala, A., Arki, M.K., Khannazer, N.H., dan Azizi, G. 2022. Potential Mechanisms of Some Selected Heavy Metals in the Induction of Inflammation and Autoimmunity. *European Journal of Inflammation*. 20: 1-14.
- Ariyani, S.B. dan Asmawit. 2017. Kemampuan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Bioadsorben Logam Perak pada Limbah Cair Sisa Pengukuran COD. *Majalah BIAM*. 13(1): 17-21.

- Astari, M.A. dan Utami, B. 2018. Uji Daya Adsorpsi Adsorben Kombinasi Sekam Padi dan Bagasse Fly Ash untuk Menjerap Logam Cu pada Sistem Batch. *Proceeding Biology Education Conference*. 15(1): 766-774.
- Bakar, R.A., Razak, Z.A., Ahmad, S.H., Bardan, B.J.S., Tsong, L.M., dan Meng, C.P. 2015. Influence of Oil Palm Empty Fruit Bunch *Biochar* on Floodwater pH and Yield Components of Rice Cultivated on Acid Sulphate Soil under Rice Intensification Practices. *Plant Production Science*. 18(4): 491-500.
- Badan Pusat Statistik. 2021. Banyaknya Desa/Kelurahan Menurut Jenis Pencemaran Lingkungan Hidup (Desa), 2014-2021. <https://www.bps.go.id/indikator/168/959/1/banyaknya-desa-kelurahan-menurut-jenis-pencemaran-lingkungan-hidup.html>. Diakses pada 11 September 2023.
- Badan Pusat Statistik. 2021. Produksi Tanaman Perkebunan. <https://www.bps.go.id/indikator/54/132/1/produksi-tanaman-perkebunan.html>. Diakses pada 7 November 2023.
- Badan Pusat Statistik. 2023. Jumlah Penduduk Pertengahan Tahun (Ribuan Jiwa), 2021-2023. <https://www.bps.go.id/indikator/12/1975/1/jumlah-penduduk-pertengahan-tahun.html>. Diakses pada 11 September 2023.
- Badan Pusat Statistik. 2023. Laju Pertumbuhan Penduduk (Persen), 2021-2023. <https://www.bps.go.id/indikator/12/1976/1/laju-pertumbuhan-penduduk.html>. Diakses pada 11 September 2023.
- Barrow, N.J. dan Hartemink, A.E. 2023. The Effects of pH on Nutrient Availability Depend on Both Soils and Plants. *Plant and Soil*. 487(1-2): 1-17.
- Bedassa, M. 2022. Correlation Ship Between Heavy Metal and Soil Physico-Chemical Propertie in Selected Areas of Central Rift Valley of Eastern Shoa Zone, Oromia Region, Ethiopia. *Journal of Biotechnology & Bioinformatics Research*. 4(2): 1-9.
- Bella, S.R., Monikasari, M., dan Zulkardesi. 2021. *Review* : Potensi Pemanfaatan *Biochar* untuk Meremediasi Lahan Bekas Tambang di Indonesia. *Jurnal Penelitian Pertanian Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh*. 20(2): 87-97.
- Boymau, I. 2023. Distribusi Logam Berat pada Tanah. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*. 2(3): 1-6.
- Cao, Q., Huang, Z., Liu, S., dan Wu, Y. 2019. Potential of *Punica granatum Biochar* to Adsorb Cu (II) in Soil. *Scientific Reports*. 9(11116): 1-13.

- Chen, D., Liu, X., Bian, R., Cheng, K., Zhang, X., Zheng, J., Joseph, S., Crowley, D., dan Pan, G. 2018. Effects of *Biochar* on Availability and Plant Uptake of Heavy Metals – A Meta-Analysis. *Journal of Environmental Management*. 222: 76-85.
- Chen, F., Chen, X., Zhu, F., dan Sun, Q. 2019. Study on The Factors Affecting The Spatial Distribution of Heavy Metal Elements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 330(042013): 1-8.
- Chintala, R., Schumacher, T.E., Mc Donald, L.M., Clay, D.E., Malo, D.D., Papiernik, S.K., Clay, S.A., dan Julson, J.L. 2013. Phosphorus Sorption and Availability from *Biochars* and Soil/ *Biochar* Mixture. *Jurnal Soil, Air, Water*. 42(5): 626-634.
- Conti, L.D., Ceretta, C.A., Ferreira, P.A.A., Lourenzi, C.R., Giroto, E., Lorensini, F., Tiecher, T.L., Marchejan, C., Anchieta, M.G., dan Brunetto, G. 2016. Soil Solution Concentrations and Chemical Species of Copper and Zinc in a Soil with a History of Pig Slurry Application and Plant Cultivation. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. 216: 374-386.
- Cora, C.C., Cid, M.C., Estevez, M.A., Calvino, D.F., dan Vega, F.A. 2020. Specific Adsorption of Heavy Metals in Soils: Individual and Competitive Experiments. *Agronomy*. 10(8): 1-21.
- Daramola, M.O. dan Ayeni, A.O (ed.). 2020. *Valorization of Biomass to Value-Added Commodities*. Springer. Switzerland.
- Dewi, G.P. dan Ginting, A.M. 2012. Antisipasi Krisis Pangan melalui Kebijakan Diversifikasi Pangan. *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*. 3(1): 65-78.
- Dewanti, D.P. 2018. Potensi Selulosa dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Bahan Baku Bioplastik Ramah Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 19(1): 81-88.
- Duwiejah, A.B., Abubakari, A.H., Quainoo, A.K., dan Amadu, Y. 2020. Review of Biochar Properties and Remediation of Metal Pollution of Water and Soil. *Journal of Health and Pollution*. 10(27): 1-20.
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A.S., Bindar, Y., dan Irawan, A. 2019. Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit menjadi *Bio-Char*, *Bio-Oil* dan Gas dengan Metode Pirolisis. *Jurnal Chemurgy*. 03(2): 12-17.
- Goncalves, M.S., Junior, L.C.S.D.S., Bettin, J.P., dan Kummer, L. 2020. Sorption and Leaching of Metals in the Soil due to Application of Dissolved Organic Matter. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*. 36(3): 703-710.

- Grim, R.E. 1942. Modern Concepts of Clay Materials. *The Journal of Clay Minerals*. 50(3): 225-275.
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., dan Anderson, R.E. 2013. *Multivariate Data Analysis*. Pearson Education Limited. London. 734 hlm.
- He, G., Zhang, Z., Wu, X., Cui, M., Zhang, J., dan Huang, X. 2020. Adsorption of Heavy Metals on Soil Collected from Lixisol of Typical Karst Areas in the Presence of CaCO₃ and Soil Clay and Their Competition Behavior. *Sustainability*. 12(7315): 1-19.
- Heryani, U., Hidayat, B., dan Mukhlis. 2018. Pemanfaatan Beberapa Jenis *Biochar* untuk Mempertahankan N-Total Tanah Inceptisol. *Jurnal Pertanian Tropik*. 5(3): 374-381.
- Hidayat, B. 2015. Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat dengan Menggunakan *Biochar*. *Jurnal Pertanian Tropik*. 2(1): 51-61.
- Huang, B., Li, Z., Huang, J., Guo, L., Nie, X., Wang, Y., Zhang, Y., dan Zeng, G. 2014. Adsorption Characteristics of Cu and Zn onto Various Size Fractions of Aggregates from Red Paddy Soil. *Journal of Hazardous Materials*. 264: 176-183.
- Imansyah, Harisandi, Tamia, N., dan Rahmawati, D. 2020. Analisis Daya Dukung Lahan Pertanian terhadap Tekanan Penduduk di Desa Sandik. *Media Komunikasi Geografi*. 21(2): 120-129.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., dan Beeregowda, K.N. 2014. Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals. *Interdiscip Toxicol*. 7(1): 60-72.
- Jiang, Y., Ma, X.L., Sun, F.Y., Guo, Y.X., Ren, L.J., Wang, Y.J., dan Xie, Z.L. 2021. A Comparative Study on The Adsorption Properties of Heavy Metal Cr in Lake Sediment and Soil. *Applied Ecology and Environmental Research*. 19(2): 901-914.
- Joseph, S., Cowie, A.L., Zwieten, L.V., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M.L., Graber, E.R., Ippolito, J.A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y.S., Palansooriya, K.N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z.H., dan Lehmann, J. 2021. How Biochar Works, and When it Doesn't: A Review of Mechanisms Controlling Soil and Plant Responses to Biochar. *Global Change Biology Bioenergy*. 13(11): 1731-1764.
- Juhri, D.A. 2017. Pengaruh Logam Berat (Kadmium, Kromium, dan Timbal) terhadap Penurunan Berat Basah Kangkung Air (*Ipomoea aquatica Forsk*) sebagai Bahan Penyuluhan bagi Petani Sayur. *Jurnal Lentera Pendidikan Pusat Penelitian LPPM UM Metro*. 2(2): 219-229.

- Kahlson, M.A. dan Dixon, S.J. 2022. Copper-Induced Cell Death. *Science*. 375(6586): 1231-1231.
- Kasno, A., Rachim, A., Iskandar., dan Adiningsih, J.S. 2004. Hubungan Nisbah K/Ca dalam Larutan Tanah dengan Dinamika Hara K pada Ultisol dan Vertisol Lahan Kering. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*. 6(1): 7-13.
- Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M.A., Hashem, A., Abdullah, E.F.A., dan Ibrar, D. 2024. Biochar Production and Characteristics, Its Impacts on Soil Health, Crop Production, and Yield Enhancement: A Review. *Plants*. 13(166): 1-18.
- Kladsomboon, S., Jaiyen, C., Choprathumma, C., Tusai, T., dan Apilux, A. 2019. Heavy Metals Contamination in Soil, Surface Water, Crops, and Resident Blood in Uthai District, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand. *Environ Geochem Health*. 42(2): 545-561.
- Li, H., Dong, X., Silva, E.B.D., Oliveira, L.M.D., Chen, Y., dan Ma, L.Q. 2017. Mechanisms of Metal Sorption by *Biochars*: *Biochar* Characteristics and Modifications. *Chemosphere*. 178: 466-478.
- Luo, Y. 2019. Study on the Repair of Heavy Metal Contaminated Soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 300(032076): 1-7.
- 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.
- Mawara, J.M. 2017. Potensi Karakteristik Lahan untuk Pengembangan Sistem Pertanian Berkelanjutan di Pulau Lembeh Kota Bitung. *Prosiding Seminar Nasional 2017 Fakultas Pertanian – UMJ, Jakarta: 28 September 2017*. 77-87.
- Mondal, N.K., Das, C., dan Datta, J.K. 2015. Effect of Mercury on Seedling Growth, Nodulation and Ultrastructural Deformation of *Vigna radiata* (L) Wilczek. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187(241).
- Mulyani, O., Machfud, Y., dan Solihin, M.A. 2023. Fungsi Hubungan Sifat Kimia Tanah dan Penggunaan Pestisida dengan Kandungan Kadmium pada Lahan Sawah. *Jurnal Agrikultura*. 34(2): 315-324.
- Mursyid., Anwar, A., Siahaan, A.S.A., Iswahyudi., Citraresmini, A., Satriawan, H., Purba, T., Fitri, R., Junairiah., Septyani, I.A.P., Paulina, M., dan Bachtiar, T. 2023. *Sifat dan Morfologi Tanah*. Yayasan Kita Menulis. Medan. 180 hlm.

- Niu, Y.Y., Zhang, Y.Y., Zhu, Z., Zhang, X.Q., Liu, X., Zhu, S.Y., Song, Y., Jin, X., Lindholm, B., dan Yu, C. 2020. Elevated Intracellular Copper Contributes a Unique Role to Kidney Fibrosis by Lysyl Oxidase Mediated Matrix Crosslinking. *Cell Death & Disease*. 11(211): 1-14.
- Nurida, N.L., Raachman, A., dan Sutono, S. 2015. *Biochar Pembenh Tanah yang Potensial*. Indonesian Agency for AgriCultural Research and Development (IAARD) Press. Jakarta. 48 hlm.
- Nursyamsi, D., Idris, K., Sabiham, S., Rachim, D.A., dan Sofyan, A. 2009. Jerapan dan Pengaruh Na^+ , NH_4^+ , dan Fe_3^+ terhadap Ketersediaan K pada Tanah-Tanah yang Didominasi Mineral Liat Smektit. *Jurnal Tanah Tropika*. 14(1): 33-40.
- Nyiramigisha, P., Komariah, dan Sajidan. Harmful Impacts of Heavy Metal Contamination in the Soil and Crops Grown Around Dumpsites. *Review in Agricultural Science*. 9: 271-282.
- Ogundele, D.T., Adio, A.A., dan Oludedde, O.E. 2015. Heavy Metal Concentrations in Plants and Soil along Heavy Traffic Roads in North Central Nigeria. *Journal of Environmental and Analytical Toxicology*. 5(6): 1-5.
- Orhue, E.R. dan Emomu, A. 2022. Freundlich, Langmuir and Temkin Isotherm Studies of Silicon Sorption on Soils Derived from Three Parent Materials in Edo State, Nigeria. *Journal of Tropical Agriculture, Food, Environment and Extension*. 21(3): 1-12.
- Park, J.H., Girish, K. C., Nanthi, S. B., Jae, W.C., dan Thammared, C. 2011. *Biochar Reduces the Bioavailability and Phytotoxicity of Heavy Metals*. *Journal Soil and Plant*. 348(1) :439-451.
- Prasetyo, B.H., Suharta, N., Subagyo., dan Hikmatullah. 2001. Chemical and Mineralogical Properties of Ultisols of Sasamba Area, East Kalimantan. *Indonesian Journal of Agricultural Science*. 2(2): 37-47.
- Prawito, P., Sitorus, I.H.W., Mukhtar, Z., Hermawan, B., dan Herman, W. 2021. Soil Properties Variability Under Various Agroecosystems in Ultisols of Bengkulu. *Journal of Land Restoration*. 4(2): 53-59.
- Purakayastha, T. J., Kumari, S., dan Pathak, H. 2015. Characterisation, Stability, and Microbial Effects of Four *Biochars* Produced from Crop Residues. *Journal Geoderma*. 239(1): 293-303.
- Purwiandono, G. dan Ibrahim, S. 2022. Adsorpsi Logam Cu (II) Menggunakan Adsorben Kulit Buah Salak Teraktivasi HNO_3 . *Indonesia Journal of Chemical Research*. 7(1): 1-7.

- Rees, F., Simonnot, M.O., dan Morel, J. L. 2014. Short-Term Effects of *Biochar* on Soil Heavy Metal Mobility Are Controlled by Intra-Particle Diffusion and Soil pH Increase. *European Journal of Soil Science*. 65(1): 149-161.
- Saeedi, A.A.A. 2022. Clay basics and Their Physical and Chemical Properties: Review Paper. *IAETSD Journal for Advanced Research in Applied Sciences*. 10(8): 13-18.
- Schoonover, J.E. dan Crim, J.F. 2015. An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. *Journal of Contemporary Water Research & Education*. 154(1): 21-47.
- Salam, A.K. 1997. Faktor Logam Berat dalam Pembuatan dan Pemanfaatan Pupuk Kimia untuk Pertanian. *Prosiding Seminar Nasional Pupuk-HITI*. 103-111.
- Salam, A.K., Djuniwati, S., Sarno., dan Harahap, J.T. 1997. Kapur dan Kompos Daun Singkong Meningkatkan Kelarutan Tembaga dan Seng asal Limbah Industri di Tanah Andisol dari Gisting Lampung. *Journal of Tropical Soils*. 2(2): 123-131.
- Salam, A.K., Djuniwati, S., dan Novpriansyah, H. 1998. Perubahan Kelarutan Seng asal Limbah Industri dalam Tanah Tropika akibat Penambahan Kapur dan Kompos Daun Singkong. *Journal of Tropical Soils*. 3(2): 111-117.
- Salam, A.K., Djuniwati, S., Widodo, S., dan Harahap, J.T. 1999. Penurunan Kelarutan Tembaga Asal Limbah Industri di dalam Tanah akibat Perlakuan Kapur dan Kompos Daun Singkong. *Jurnal Tanah Tropika*. 8: 153-160.
- Salam, A.K., Sarno, dan Sriyani, N. 1998. Tanggapan Tanaman Jagung terhadap Limbah Industri Berlogam Berat di Tanah Ultisol Sidosari Natar Lampung. *Prosiding Seminar Nasional dan Pertemuan Tahunan KOMDA HITI 1998*. 436-441.
- Salam, A.K. 2000. A Four Year Study on The Effects of Manipulated Soil pH and Organic Matter Contents on Availabilities of Industrial-Waste-Origin Heavy-Metals in Tropical Soils. *Jurnal Tanah Tropis*. 11: 31-46.
- Salam, A.K. 2017. *Management of Heavy Metals in Tropical Soil Environment*. Global Madani Press, Bandar Lampung. 270 hlm.
- Salam, A.K. dan Ginanjar, K. 2018. Tropical Soil Labile Fractions of Copper in the Experimental Plots ±Ten Years after Application of Copper-Containing-Waste. *Journal Tropical Soils*. 23(1): 11-18.
- Salam, A.K. 2020. *Ilmu Tanah*. Global Madani Press, Bandar Lampung. 393 hlm.

- Salam, A.K., Hidayatullah, M.A., Supriatin, dan Yusnaini, S. 2020. The Phytoextraction of Cu and Zn by Elephant Grass (*Pennisetum purpureum*) from Tropical Soil 21 Years After Amendment with Industrial Waste Containing Heavy Metals. *7th International Conference on Sustainable Agriculture and Environment (ICSAE-7)*, Surakarta: 25-27 Agustus 2020. 1-9.
- Salam, A.K., Pakpahan, A.F., Susilowati, G., Fernando, N., Sriyani, N., Sarno, Novpriansyah, H., Yusnaini, S., dan Dermiyati. 2021. The Residual Copper and Zinc in Tropical Soil over 21 Years after Amendment with Heavy Metal Containing Waste, Lime, and Compost. *Applied and Environmental Soil Science*. 1-14.
- Salam, A.K., Rizki, D.O., Santa, I.T.D., Supriatin, Septiana, L.M., Sarno, dan Niswati, A. 2021. The Biochar-Improved Growth-Characteristics of Corn (*Zea mays* L.) in a 22-Years Old Heavy-Metal Contaminated Tropical Soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1034(012045): 1-10.
- Salam, A.K. 2022. The Potential Roles of Biochar in Restoring Heavy-Metal-Polluted Tropical Soils and Plant Growth. *IntechOpen*. Hal: 1-21.
- Salam, A.K. 2023. *Pengantar Ilmu Kimia Tanah*. Global Madani Press, Bandar Lampung. 191 hlm.
- Salmina. 2016. Studi Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit oleh Masyarakat di Jorong Koto Sawah Nagari Ujung Gading Kecamatan Lembah Melintang. *Jurnal Spasial*. 3(2): 33-40.
- Sarah, S., Baharuddin., dan Bustan. 2024. Sebaran Nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan Kemasaman (pH) Tanah di Tanah Vertisol Kecamatan Sakra Kabupaten Lombok Timur. *Journal of Soil Quality and Management*. 3(1): 1-6.
- Savitri, A., Andrio, D., dan Helwani, Z. 2022. Karakteristik *Magnetic Biochar* sebagai Adsorben untuk Pemanfaatan Kembali Buangan Akhir POME untuk Air Baku Industri. *Seminar Nasional Riset dan Inovasi Teknologi*, Riau: 13 Juli 2022. 381-391.
- Septiyana., Husnain, Widowati, L.R., Siregar, A.F., dan Samsun, A. 2021. The Use of Soil Ameliorants and Fertilizers to Increase the Yields of Rice and Maize in Ultisols Lampung, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 648(012198): 1-8.
- Silva, G., Salam, A.K., Aini, N.S., Buchari, H. 2021. Phytoextraction Copper From the Tropical Realm 21 Years after Amandemnt with Waste Containing Heavy Metals. *Journal of Tropical Soils*. 26(1): 11-18.

- Sintorini, M.M., Widyatmoko, H., Sinaga, E., dan Aliyah, N. 2021. Effect of pH on Metal Mobility in the Soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 737(012071): 1-6.
- Subarkhah, M.J. dan Titah, H.S. 2023. Remediasi Logam Berat Pb dengan Menggunakan *Biochar* Sekam Padi dan Tongkol Jagung. *Jurnal Sains dan Seni ITS*. 12(1): 48-53.
- Sudadi, U., Anggriawan, R., dan Anwar, S. 2019. Aplikasi Kleinano dari Tuf Volkan Gunung Salak Indonesia sebagai Adsorben Alami Kontaminan Anionik: Fosfat Perairan. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*. 9(4): 1032-1040.
- Sujana, I.P. dan Pura, I.N.L.S. 2015. Pengelolaan Tanah Ultisol dengan Pemberian Pembenh Organik *Biochar* Menuju Pertanian Berkelanjutan. *Jurnal Pertanian Berbasis Keseimbangan Ekosistem*. 5(9): 1-9.
- Sulaeman., Suparto., dan Eviati. 2005. *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk*. Balai Penelitian Tanah. Bogor. 136 hlm.
- Sunil, B.H., Pushpalatha, M., Basavaprasad, V.M., dan Huvana, T.P. 2018. Modified Nano-Clay Formulation and Their Application. *International Journal of Chamical Studies*. 6(4): 705-710.
- Supraptiah, E., Ningsih, A.S., dan Hilwatulisan. 2019. Kinetika Adsorpsi Mn dengan Memanfaatkan Bottom *Ash* Batubara pada Larutan Artifisial $KMnO_4$. *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri 2019*. 220-227.
- Suryani, I. 2014. Kapasitas Tukar Kation (KTK) Berbagai Kedalaman Tanah pada Areal Konversi Lahan Hutan. *Jurnal Agrisistem*. 10(2): 99-106.
- 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): 166-172.
- Swenson, H. dan Stadie, N.P. 2019. Langmuir's Theory of Adsorption: A Centennial Review. *American Chemical Society Publications*. 35: 5409-5426.
- Szabela, D.A., Markiewicz, J., Wolf, W.M. 2015. Heavy Metal Uptake by Herbs. IV. Influence of Soil pH on the Content of Heavy Metals in *Valeriana officinalis* L.. *Water Air Soil Pollut*. 226(106): 3-8.

- Szulejko, J.E. dan Kim, K.H. 2019. Is the Maximum Adsorption Capacity Obtained at High VOC Pressures (> 1000 Pa) Really Meaningful in Real-World Applications For The Sorptive Removal Of VOCs under Ambient Conditions (< 1 Pa)? *Separation and Purification Technology*. 228(115729): 1-5.
- Tan, K. H. 2005. *Soil sampling, Preparation and Analysis 2nd Edition*. Boca Raton, FL. Taylor & Francis Group. London. New York. 622 hlm.
- Tvrda, E., Peer, R., Sikka, S.C., dan Agarwal, A. 2014. Iron and Copper in Male Reproduction: A Double-Edged Sword. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*. 32: 3-16.
- Utomo, M., Sudarsono, Rusman, B., Sabrina, T., Lumbanraja, J., dan Wawan. 2016. *Ilmu Tanah Dasar-Dasar dan Pengelolaan*. Prenadamedia Group, Jakarta. 459 hlm.
- Wahyuni, M., Maharany, R., Sundari, E.P., dan Rosnina. 2021. Respon Pemberian *Biochar* Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Pupuk NPK pada Media Tanam terhadap Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit. *Jurnal Agrium*. 18(2): 109-118.
- Wairich, a., Conti, L.D., Lamb, T.I., Keil, R., Neves, L.O., Brunetto, G., Sperotto, R.A., dan Ricachenevsky, F.K. 2016. Throwing Copper Around: How Plants Control Uptake, Distribution, and Accumulation of Copper. *Agronomy*. 12(994): 1-29.
- Walkley, A. dan Black, I.A. 1934. An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*. 37: 29-37.
- Wan, Q., Zhu, G., Guo, H., Zhang, Y., Pan, H., Yong, L., dan Ma, H. 2019. Influence of Vegetation Coverage and Climate Environment on Soil Organic Carbon in the Qilian Mountains. *Scientific Reports*. 9(17623): 1-9.
- Wang, S., Xu, Y., Norbu, N., dan Wang, Z. 2018. Remediation of *Biochar* on Heavy Metal Polluted Soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 108(4): 1-7.
- Wang, Y., Li, He., dan Lin, S. 2022. Advances in the Study of Heavy Metal Adsorption from Water and Soil by Modified *Biochar*. *Water*. 14(23): 1-11.
- Wang, Z. dan Lei, G. 2018. Study on Penetration Effect of Heavy Metal Migration in Different Soil Types. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 394(5): 1-9.

- Wang, Z., Zhang, L., Sun, G., Zhou, W., Sheng, J., Ye, X., Olaniran, A.O., dan Kana, G. E.B. 2022. Adsorption Characteristics of Three Types of Soils on Biogas Slurry Ammonium Nitrogen. *Frontiers Environmental Science*. 10: 1-12.
- Widijanto, H., Suntoro., Mujiyo., dan Syamsiyah, J. 2022. The Effect of Agricultural Waste Biochar on the Availability of Silicon in Ultisol and Inceptisol Under Flooded Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1114(012035): 1-6.
- Winarmadani, S. 2019. *Analisis Kandungan Logam Berat (Pb, Cd, Cu, Fe) pada Tanah di Rawapening Kabupaten Semarang Jawa Tengah*. (Skripsi). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Witt, B., Stiboller, M., Raschke, S., Friese, S., Ebert, F., dan Schwerdtle, T. 2021. Characterizing Effects of Excess Copper Levels in a Human Astrocytic Cell Line with Focus on Oxidative Stress Markers. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 65: 126711.
- Xie, S., Wen, Z., Zhan, H., dan Jin, M. 2018. An Experimental Study on the Adsorption and Desorption of Cu (II) in Silty Clay. *Geofluids*. 2018(4): 1-12.
- Xu, D., Yu, X., Chen, J., Li, X., Chen, J., dan Li, J. 2023. Effects of Compost as a Soil Amendment on Bacterial Community Diversity in Saline–Alkali Soil. *Frontiers Microbiology*. 14: 1-11.
- Yang, H., Liu, C.N., Wolf, R.M., Ralle, M., Dev, S., Pierson, H., Askin, F., Steele, K.E., Magnuson, T.H., Schweitzer, M.A., Wong, G.W., dan Lutsenko, S. 2019. Obesity is Associated with Copper Elevation in Serum and Tissue. *Metallomics*. 11(8): 1363-1371.
- Yang, P., Dong, W., Heinen, M., Qin, W., dan Oenema, O. 2022. Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. *Land*. 11(645): 1-18.
- Yu, H., Li, C., Yan, J., Ma, Y., Zhou, X., Yu, W., Kan, H., Meng, Q., Xie, R., dan Dong, P. 2023. A Review on Adsorption Characteristics and Influencing Mechanism of Heavy Metals in Farmland Soil. *Royal Society of Chemistry*. 13: 3505-3519.
- Yuniarti, A., Herdiyantoro, E.A., dan Auliya. 2023. Increase in CEC, K-dd, K Uptake, Si-Total, and Yield of Lowland Rice (*Oryza sativa* L.) Due to Different Doses of Organic and Inorganic Fertilizers on Ultisol. *Journal of Education Technology Information Social Sciences and Health*. 2(2): 940-948.

- Yustinah, Hudzaifah., Aprilia, M., dan Syamsudin. 2019. Kesetimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) dengan Adsorben Tanah Diatomit secara *Batch*. *Jurnal Konversi*. 9(1): 17-28.
- Zhang, G., Liu, T., li, H., Wang, Z., Huang, X., Yi, X., dan Yan, D. 2024. Experimental Study on the Effects of Heavy Metal Pollution on Soil Physical Properties and Microstructure Evolution. *Applied Sciences*. 14(2022): 1-13.
- Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X., Liu, X., Zhu, Y., Ding, G., Zhang, J., Zeng, X., dan Du, W. 2020. Soil Aggregates Stability and Storage of Soil Organic Carbon Respond to Cropping Systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*. 10(265): 1-13.
- Zubairu, A.M., Ngala, A.L., Jwari, S.J., Usman, K., dan Buba, M.T. 2022. Exploring the Effect of *Biochar* on Soil pH (A Review). *Proceedings of the 46th Conference of Soil Science Society of Nigeria; Sustaining Living Soil Ecosystem through Adoption of Soil Management Practices for Mitigating Climate Change for National Development*. 223-228.