

**PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TERHADAP
Cu DAN Zn TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT
PERLAKUAN BIOCHAR TONGKOL JAGUNG**

(Skripsi)

Oleh

Inggit Putri Mediva
2114181010



**JURUSAN ILMU TANAH
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

**PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TERHADAP
Cu DAN Zn TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT
PERLAKUAN BIOCHAR TONGKOL JAGUNG**

Oleh

Inggit Putri Mediva

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Sarjana Pertanian

Pada

**Jurusan Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TERHADAP Cu DAN Zn TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT PERLAKUAN BIOCHAR TONGKOL JAGUNG

Oleh

Inggit Putri Mediva

Logam berat tembaga dan seng merupakan bahan pencemar yang tidak dapat terurai dan dapat terakumulasi pada lingkungan dan organisme. Logam berat dapat menjadi berbahaya bagi makhluk hidup apabila melebihi batas kritis di dalam tanah akibat pencemaran logam berat dari limbah industri sendok logam dari PT *Star Metal Ware Industry*, Jakarta. Biochar dapat menjadi alternatif dalam mengurangi ketersediaan logam berat melalui kemampuannya dalam menyerap logam berat di dalam tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perubahan kapasitas dan energi jerap tanah tercemar logam berat Cu dan Zn yang diperlakukan biochar tongkol jagung yang menjadi bahan pembenah tanah.

Penelitian ini dilaksanakan di Rumah Plastik Perguruan Tinggi Al-Madani, Laboratorium Jurusan Ilmu Tanah, dan UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dua faktorial yang terdiri dari sembilan kombinasi perlakuan dan diulang sebanyak tiga kali sehingga menghasilkan 27 satuan percobaan. Faktor pertama tanah tanpa logam berat 0 Mg ha⁻¹ (S₀) atau kontrol, tanah logam berat konsentrasi rendah 15 Mg ha⁻¹ (S₁) dan tanah logam berat konsentrasi tinggi 60 Mg ha⁻¹ (S₂). Faktor kedua biochar tongkol jagung 0 Mg ha⁻¹ (B₀), 5 Mg ha⁻¹ (B₁), dan 10 Mg ha⁻¹ (B₂). Perubahan kapasitas dan energi jerap ditentukan menggunakan persamaan Isotermal Langmuir dan konsentrasi diukur menggunakan *flame* AAS. Data dianalisis menggunakan *Standard Error of The Mean* (SEM) dan diuji lanjut menggunakan metode regresi linier dengan *Microsoft Excel* untuk melihat korelasi antar nilai b dan K, Cu dan Zn tersedia, pH tanah, KTK tanah C-organik, dan kadar liat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan biochar tongkol jagung 10 Mg ha⁻¹ mampu menurunkan ketersediaan logam Cu dan Zn pada tanah dengan tingkat ketercemaran logam berat rendah (S₁), sedangkan biochar tongkol jagung

pada tingkat logam berat kontrol (S_0) dan tinggi (S_2) tidak menurunkan ketersediaan Cu dan Zn. Adanya perubahan yang terjadi setelah penambahan biochar tongkol jagung 10 Mg ha^{-1} yang mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) disetiap tingkat logam berat, sedangkan pada tanah tingkat logam berat kontrol (S_0) penambahan biochar mampu menurunkan konstanta energi adsorpsi logam Cu (K_{Cu}), tetapi tingkat logam berat rendah (S_1) dan tinggi (S_2) tidak berbeda nyata. Nilai b dan K terhadap logam Zn dalam penelitian ini lebih rendah dibandingkan logam Cu dan koefisien determinasi (R^2) logam Zn tidak mendekati angka 1 pada grafik persamaan Isotermal Langmuir sehingga model Isotermal Langmuir tidak dapat digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi antara biochar tongkol jagung dan logam Zn. Adanya antara kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) yang berkorelasi nyata negatif dengan Cu tersedia, Zn tersedia dan pH tanah, berkorelasi negatif tidak nyata dengan C-organik tanah, berkorelasi nyata positif dengan kadar liat, dan berkorelasi positif tidak nyata dengan KTK tanah. Konstanta energi adsorpsi (K_{Cu}) berkorelasi nyata negatif dengan pH dan kadar liat tanah, berkorelasi tidak nyata negatif dengan ketersediaan Cu dan Zn, serta berkorelasi tidak nyata positif dengan KTK dan C-organik tanah dengan *Simple Linear Regression*. Kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) berkorelasi nyata negatif dengan ketersediaan Cu dan pH tanah serta berkorelasi nyata positif dengan ketersediaan Zn, KTK, kadar liat, dan C-organik tanah. Sementara itu, konstanta energi adsorpsi logam Cu (K_{Cu}) berkorelasi nyata positif dengan ketersediaan Cu dan Zn, serta berkorelasi negatif dengan pH, KTK, kadar liat, dan C-organik tanah dengan uji *Multiple Linear Regression*.

Kata kunci : biochar, tongkol jagung, logam berat, kapasitas adsorpsi maksimum (b), konstanta energi adsorpsi (K), Isotermal Langmuir, *Standart Error of The Mean*, Cu tersedia, Zn tersedia, pH, KTK, kadar liat, C-organik.

ABSTRACT

CHANGES IN CAPACITY AND ABSORPTION ENERGY TOWARDS Cu AND Zn SOIL CONTAMINATED WITH HEAVY METALS DUE TO CORN COB BIOCHAR TREATMENT

By

Inggit Putri Mediva

Heavy metals copper and zinc are non-biodegradable pollutants that can accumulate in the environment and organisms. Heavy metals can be harmful to living things if they exceed critical limits in the soil due to heavy metal pollution from metal spoon industrial waste from PT Star Metal Ware Industry, Jakarta. Biochar can be an alternative in reducing the availability of heavy metals through its ability to adsorb heavy metals in the soil. This study aims to study the changes in the capacity and adsorption energy of soil contaminated with heavy metals Cu and Zn treated with corn cob biochar as a soil conditioner.

This study was conducted at the Al-Madani College Plastic House, Soil Science Department Laboratory, and UPTD Environmental Laboratory of the Lampung Provincial Environmental Service using a two-factorial Completely Randomized Design (CRD) consisting of nine treatment combinations and repeated three times to produce 27 experimental units. The first factor is soil without heavy metals 0 Mg ha⁻¹ (S₀) or control, low concentration heavy metal soil 15 Mg ha⁻¹ (S₁) and high concentration heavy metal soil 60 Mg ha⁻¹ (S₂). The second factor is corn cob biochar 0 Mg ha⁻¹ (B₀), 5 Mg ha⁻¹ (B₁), and 10 Mg ha⁻¹ (B₂). Changes in adsorption capacity and energy were determined using the Langmuir Isothermal equation and concentrations were measured using flame AAS. Data were analyzed using the Standard Error of The Mean (SEM) and further tested using the linear regression method with Microsoft Excel to see the correlation between b and K values, available Cu and Zn, soil pH, CEC of organic-C soil, and clay content.

The results showed that the addition of 10 Mg ha⁻¹ corn cob biochar was able to reduce the availability of Cu and Zn metals in soil with low levels of heavy metal contamination (S₁), while corn cob biochar at control (S₀) and high (S₂) heavy metal levels did not reduce the availability of Cu and Zn. The addition of

10 Mg ha⁻¹ corn cob biochar was able to increase the maximum adsorption capacity of Cu metal (b_{Cu}) at each heavy metal level, while in the soil at the control heavy metal level (S_0) the addition of biochar was able to reduce the adsorption energy constant of Cu metal (K_{Cu}), but the low (S_1) and high (S_2) heavy metal levels were not significantly different. The b and K values for Zn metal in this study were lower than Cu metal and the coefficient of determination (R^2) of Zn metal did not approach the number 1 on the Langmuir Isothermal equation graph so that the Langmuir Isothermal model cannot be used to describe the adsorption process that occurs between corn cob biochar and Zn metal.. The existence of the maximum adsorption capacity of Cu metal (b_{Cu}) which is significantly negatively correlated with available Cu metal, available Zn and soil pH, negatively correlated not significantly with soil organic C, significantly positively correlated with clay content, and positively correlated not significantly with soil CEC. The adsorption energy constant (K_{Cu}) is significantly negatively correlated with soil pH and clay content, negatively correlated not significantly with the availability of Cu and Zn, and positively correlated not significantly with CEC and soil organic C with Simple Linear Regression. The maximum adsorption capacity of Cu metal (b_{Cu}) is significantly negatively correlated with the availability of Cu and soil pH and positively correlated with the availability of Zn, CEC, clay content, and soil organic C. Meanwhile, the adsorption energy constant of Cu metal (K_{Cu}) is significantly positively correlated with the availability of Cu and Zn, and negatively correlated with pH, CEC, clay content, and soil organic C with Multiple Linear Regression test.

Keywords : biochar, corn cob, heavy metals, maximum adsorption capacity (b), adsorption energy constant (K), Langmuir Isothermal, Standard Error of The Mean, available Cu, available Zn, pH, CEC, clay content, organic C.

Judul Skripsi : PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI
JERAP TERHADAP Cu DAN Zn TANAH
TERCEMAR LOGAM BERAT AKIBAT
PERLAKUAN BIOCHAR TONGKOL JAGUNG

Nama Mahasiswa : **Inggit Putri Mediva**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2114181010

Program Studi : Ilmu Tanah

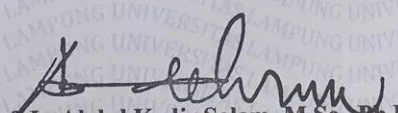
Fakultas : Pertanian



1. Komisi Pembimbing

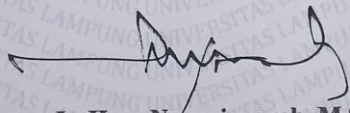
Pembimbing pertama

Pembimbing kedua


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

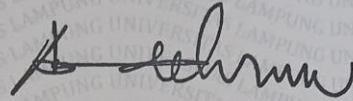

Nur Afni Afrianti, S.P., M.Sc.
NIP 198404012012122002

2. Ketua Jurusan Ilmu Tanah


Ir. Hery Novpriansyah, M.Si.
NIP 196611151990101001

MENGESAHKAN

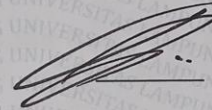
1. Tim Penguji



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

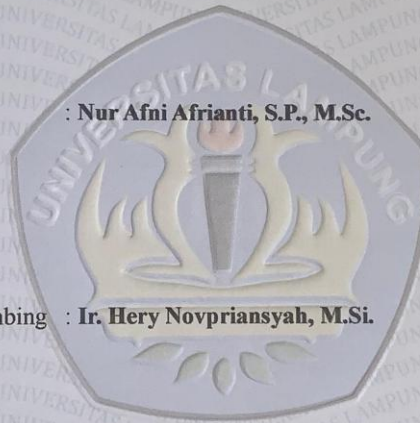
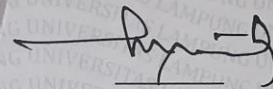
Sekretaris

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



Penguji

Bukan Pembimbing : **Ir. Hery Novpriansyah, M.Si.**

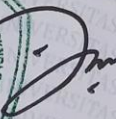


2. Dekan Fakultas Pertanian



Dekan Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP 196411181989021002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 7 Agustus 2025

SURAT PERNYATAAN

Saya bertanda tangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap terhadap Cu dan Zn Tanah Tercemar Logam Berat akibat Perlakuan Biochar Tongkol Jagung”** yang merupakan hasil karya sendiri bukan hasil orang lain.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian dosen Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, yang sumber dananya bersifat pribadi kepemilikannya, yaitu oleh Bapak Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini saya kutip dari hasil karya orang lain dan telah saya tuliskan sumbernya secara jelas sesuai kaidah, norma, dan etika penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Jika di kemudian hari terbukti skripsi ini merupakan hasil salinan atau karya ilmiah yang dibuat orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 7 Agustus 2025

Penulis,



Inggit Putri Mediva

NPM 2114181010

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Lampung Tengah pada tanggal 11 Mei 2003 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara dari Bapak Wardi dan Ibu Windarti. Penulis memulai pendidikan di PAUD Ikatan Istri Karyawan PT GGP pada tahun 2008, melanjutkan pendidikan di TK Permata Hati tahun 2009-2010, lalu melanjutkan pendidikan di SD Negeri 5 Lempuyang Bandar tahun 2011-2016. Penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 3 Way Pengubuan tahun 2017-2019. Penulis melanjutkan pendidikan di MAN 1 Lampung Tengah dalam 2 tahun 2020-2021.

Pada tahun 2021 penulis melanjutkan pendidikan yang terpilih sebagai mahasiswa Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa aktif Universitas Lampung, penulis aktif menjadi asisten dosen Mata Kuliah Dasar-Dasar Ilmu tanah tahun 2023/2024 dan asisten Mata Kuliah Teknik Penelitian tahun 2023/2024. Selain menjadi asisten dosen, penulis aktif dalam Organisasi Gamatala (Gabungan Mahasiswa Ilmu Tanah) sebagai anggota bidang Komunikasi dan Informasi. Pada tahun 2024, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Kebun Dalam, Mesuji. Selain itu, penulis juga melaksanakan Praktik Umum (PU) di UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung yang melakukan analisis kandungan logam berat pada sampel uji air.

*Life is not about getting what we want, but about appreciating what we have and
being patient for what we dream of.*

SANWACANA

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

Penulis menyadari bahwa skripsi ini dapat selesai tanpa bantuan dan arahan dari berbagai pihak. Dengan demikian, pada kesempatan ini izinkan 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 dan selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, ilmu, dan nasihat yang membantu dalam kesempurnaan skripsi penulis.
3. Bapak Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama atas dukungan, bimbingan, ilmu, nasihat, dan mendanai penelitian yang telah diberikan kepada penulis dari awal hingga akhir penyusunan skripsi.
4. Ibu Nur Afni Afrianti, S.P., M.Sc. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan dukungan, bimbingan, ilmu, dan nasihat yang telah diberikan kepada penulis dari awal hingga akhir penyusunan skripsi.

5. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, motivasi, dan bimbingan dalam perkuliahan dari awal masuk kuliah hingga saat ini.
6. Analis, Laboran, dan Admin Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung yang telah memberikan bantuan selama penulis melaksanakan penelitian di laboratorium dan segala urusan administrasi.
7. UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung yang sudah membantu penulis dalam pelaksanaan penelitian hingga akhir.
8. Kedua orang tua Bapak dan Ibu tercinta, Bapak Wardi dan Ibu Windarti yang telah mendoakan, mendidik, dan mendukung penulis hingga dapat menyelesaikan kuliah.
9. Kedua saudara kakak dan adik tercinta, Ardian dan Radit yang telah memberikan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan kuliah.
10. Teman satu penelitian Nesa Pradani S.P. yang telah memberikan motivasi, semangat, saran, dan perhatian sehingga penelitian berjalan dengan lancar.
11. Teman satu penelitian Yesi Ardina S.P. yang telah memberikan motivasi dan semangat sehingga penelitian berjalan dengan lancar.
12. Sahabat-sahabat penulis yang seperti keluarga sendiri Wulan, Mba Risma, Mba Lita, Angga, Farhan, Agung, Dika, Tanti, Addin, Trisa, Yerri, Zahwa, Maya, dan Okta yang telah menemani dan memotivasi penulis hingga skripsi selesai.
13. Teman-teman Jurusan Ilmu Tanah 2021, 2020, dan 2019 yang telah memberikan dukungan dan menemani penulis selama kuliah.
14. Inggit Putri Mediva yang telah bertahan menghadapi semua suka dan duka dalam penyelesaian skripsi.

Bandar Lampung, 7 Agustus 2025

Inggit Putri Mediva
NPM 2114181010

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xxii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Kerangka Pemikiran	4
1.5 Hipotesis.....	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Pencemaran Tanah akibat Logam Berat Cu dan Zn	8
2.2 Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap oleh Biochar	9
2.3 Peran Biochar Tongkol Jagung dalam Menurunkan Logam Berat Cu dan Zn.....	11
2.4 Pengaruh Biochar terhadap Kapasitas dan Energi Jerap Tanah terhadap Logam Berat	13
III. METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Waktu dan Tempat.....	17
3.2 Alat dan Bahan	17
3.3 Metode	17

3.4 Tata Letak Satuan Percobaan.....	18
3.5 Pelaksanaan Percobaan	20
3.5.1 Persiapan Sampel Tanah	20
3.5.2 Penyiapan Biochar	21
3.5.3 Pengaplikasian Biochar Tongkol Jagung dan Inkubasi.....	21
3.5.4 Pengairan Contoh Tanah	22
3.5.5 Pengambilan Contoh Tanah Setelah Inkubasi 4 Pekan	22
3.5.6 Analisis Tanah	22
3.5.7 Analisis Data	23
3.5.8 Penetapan Nilai b dan K dengan Persamaan Langmuir.....	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Tanah dengan Riwayat Limbah Industri	27
4.2 Kapasitas Adsorpsi Maksimum (b_{Cu}) dan Konstanta Energi Adsorpsi (K_{Cu}) setelah Penambahan Biochar Tongkol Jagung	33
4.3 Beberapa Sifat Tanah dengan Riwayat Limbah Industri dengan Penambahan Biochar Tongkol Jagung	38
4.4 Korelasi Kapasitas Adsorpsi Maksimum (b_{Cu}) dan Konstanta Energi Adsorpsi (K_{Cu}) terhadap Sifat Tanah	47
V. KESIMPULAN	52
5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA.....	54
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
<u>Nas</u>	
1. Pengambilan contoh tanah di Sidosari, 1998	19
2. Parameter analisis tanah	23
3. Pencampuran contoh tanah dengan larutan logam	24
4. Penentuan Isoterm Langmuir $y=a+zx$	25
5. Perhitungan nilai b dan K untuk sejumlah n satuan percobaan (persamaan $y=a+zx$)	26
6. Kapasitas jerap (b) dan energi jerap (K) tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri	27
7. Beberapa sifat tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri	29
8. Kapasitas jerap (b) dan energi jerap (K) tanah terhadap logam berat Cu dalam tanah setelah penambahan biochar tongkol jagung	33
9. Beberapa sifat tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri dengan penambahan biochar tongkol jagung	41
10. Korelasi kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) terhadap sifat tanah	47
11. Korelasi konstanta energi adsorpsi (K_{Cu}) terhadap sifat tanah	50
<u>Lampiran</u>	
12. Hasil pengukuran larutan seri logam berat Cu menggunakan AAS	64

13.	Hasil pengukuran larutan seri logam berat Zn menggunakan AAS.....	64
14.	Hasil pengukuran logam berat Cu lima konsentrasi menggunakan AAS	66
15.	Hasil pengukuran logam berat Zn lima konsentrasi menggunakan AAS	71
16.	Hasil pengukuran larutan standar logam Cu menggunakan AAS.....	76
17.	Hasil pengukuran larutan standar logam Zn menggunakan AAS.....	76
18.	Pengaruh biochar tongkol jagung terhadap kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat Cu	78
19.	Pengaruh biochar tongkol jagung terhadap kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat Zn	78
20.	Pengaruh biochar tongkol jagung terhadap sifat-sifat tanah	79
21.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	89
22.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1)	89
23.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1)	89
24.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0).....	90
25.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1).....	90
26.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2).....	90

27.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	91
28.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1).....	91
29.	Perhitungan nilai b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2).....	91
30.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0).....	92
31.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1).....	92
32.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2).....	92
33.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0).....	93
34.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1).....	93
35.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2).....	93
36.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	94
37.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1).....	94
38.	Perhitungan nilai b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2).....	94

39.	Statistik regresi hubungan b_{Cu} dengan Cu tersedia	101
40.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Cu} terhadap Cu tersedia	101
41.	Koefisien regresi b_{Cu} terhadap Cu tersedia dan intersep	101
42.	Statistik regresi hubungan b_{Cu} dengan Zn tersedia.....	101
43.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Cu} terhadap Zn tersedia	102
44.	Koefisien regresi b_{Cu} terhadap Zn tersedia dan intersep	102
45.	Statistik regresi hubungan b_{Cu} dengan pH.....	102
46.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Cu} terhadap pH	102
47.	Koefisien regresi b_{Cu} terhadap pH dan intersep	102
48.	Statistik regresi hubungan b_{Cu} dengan KTK	103
49.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Cu} terhadap KTK	103
50.	Koefisien regresi b_{Cu} terhadap KTK dan intersep.....	103
51.	Statistik regresi hubungan b_{Cu} dengan kadar liat	103
52.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Cu} terhadap kadar liat.....	104
53.	Koefisien regresi b_{Cu} terhadap kadar liat dan intersep	104
54.	Statistik regresi hubungan b_{Cu} dengan C-organik	104
55.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Cu} terhadap C-organik	104
56.	Koefisien regresi b_{Cu} terhadap C-organik dan intersep.....	104
57.	Statistik regresi hubungan b_{Cu} dengan seluruh data pendukung	105
58.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Cu} terhadap seluruh data pendukung.....	105

59.	Koefisien regresi b_{Cu} terhadap seluruh data pendukung dan intersep.....	105
60.	Statistik regresi hubungan K_{Cu} dengan Cu tersedia	106
61.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Cu} terhadap Cu tersedia	106
62.	Koefisien regresi K_{Cu} terhadap Cu tersedia dan intersep	106
63.	Statistik regresi hubungan K_{Cu} dengan Zn tersedia.....	106
64.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Cu} terhadap Zn tersedia.....	107
65.	Koefisien regresi K_{Cu} terhadap Zn tersedia dan intersep	107
66.	Statistik regresi hubungan K_{Cu} dengan pH	107
67.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Cu} terhadap pH	107
68.	Koefisien regresi K_{Cu} terhadap pH dan intersep	107
69.	Statistik regresi hubungan K_{Cu} dengan KTK	108
70.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Cu} terhadap KTK	108
71.	Koefisien regresi K_{Cu} terhadap KTK dan intersep	108
72.	Statistik regresi hubungan K_{Cu} dengan kadar liat	108
73.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Cu} terhadap kadar liat	109
74.	Koefisien regresi K_{Cu} terhadap kadar liat dan intersep	109
75.	Statistik regresi hubungan K_{Cu} dengan C -organik	109
76.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Cu} terhadap C -organik	109
77.	Koefisien regresi K_{Cu} terhadap C -organik dan intersep	109
78.	Statistik regresi hubungan K_{Cu} dengan seluruh data pendukung.....	110

79.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Cu} terhadap seluruh data pendukung	110
80.	Koefisien regresi K_{Cu} terhadap seluruh data pendukung dan intersep	110
81.	Statistik regresi hubungan b_{Zn} dengan Cu tersedia	111
82.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Zn} terhadap Cu tersedia	111
83.	Koefisien regresi b_{Zn} terhadap Cu tersedia dan intersep	111
84.	Statistik regresi hubungan b_{Zn} dengan Zn tersedia	111
85.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Zn} terhadap Zn tersedia	112
86.	Koefisien regresi b_{Zn} terhadap Zn tersedia dan intersep	112
87.	Statistik regresi hubungan b_{Zn} dengan pH	112
88.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Zn} terhadap pH	112
89.	Koefisien regresi b_{Zn} terhadap pH dan intersep	112
90.	Statistik regresi hubungan b_{Zn} dengan KTK	113
91.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Zn} terhadap KTK	113
92.	Koefisien regresi b_{Zn} terhadap KTK dan intersep	113
93.	Statistik regresi hubungan b_{Zn} dengan kadar liat	113
94.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Zn} terhadap kadar liat	114
95.	Koefisien regresi b_{Zn} terhadap kadar liat dan intersep	114
96.	Statistik regresi hubungan b_{Zn} dengan C-organik	114
97.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Zn} terhadap C-organik	114

98.	Koefisien regresi b_{Zn} terhadap C-organik dan intersep	114
99.	Statistik regresi hubungan b_{Zn} dengan seluruh data pendukung	115
100.	Analisis ragam untuk uji signifikansi b_{Zn} terhadap seluruh data pendukung	115
101.	Koefisien regresi b_{Zn} terhadap seluruh data pendukung dan intersep.....	115
102.	Statistik regresi hubungan K_{Zn} dengan Cu tersedia.....	116
103.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Zn} terhadap Cu tersedia	116
104.	Koefisien regresi K_{Zn} terhadap Cu tersedia dan intersep	116
105.	Statistik regresi hubungan K_{Zn} dengan Zn tersedia	116
106.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Zn} terhadap Zn tersedia.....	117
107.	Koefisien regresi K_{Zn} terhadap Zn tersedia dan intersep.....	117
108.	Statistik regresi hubungan K_{Zn} dengan pH.....	117
109.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Zn} terhadap pH	117
110.	Koefisien regresi K_{Zn} terhadap pH dan intersep.....	117
111.	Statistik regresi hubungan K_{Zn} dengan KTK.....	118
112.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Zn} terhadap KTK	118
113.	Koefisien regresi K_{Zn} terhadap KTK dan intersep	118
114.	Statistik regresi hubungan K_{Zn} dengan kadar liat	118
115.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Zn} terhadap kadar liat	119
116.	Koefisien regresi K_{Zn} terhadap kadar liat dan intersep.....	119
117.	Statistik regresi hubungan K_{Zn} dengan C-organik.....	119

118.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Zn} terhadap C-organik	119
119.	Koefisien regresi K_{Zn} terhadap C-organik dan intersep.....	119
120.	Statistik regresi hubungan K_{Zn} dengan seluruh data pendukung	120
121.	Analisis ragam untuk uji signifikansi K_{Zn} terhadap seluruh data pendukung.....	120
122.	Koefisien regresi K_{Zn} terhadap seluruh data pendukung dan intersep	120

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
<u>Nas</u>	
1. Kerangka pemikiran pengaruh kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada logam berat akibat perlakuan biochar tongkol jagung	7
2. Mekanisme adsorpsi logam berat oleh biochar (Bird, 1993)	13
3. Grafik Persamaan Isotermal Langmuir	15
4. Tata letak satuan percobaan.....	19
5. Tata letak percobaan di Sidosari, 1998.....	20
6. Pengairan contoh tanah secara kapiler	22
7. Hubungan b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah dengan riwayat limbah industri setelah penambahan biochar tongkol jagung	36
<u>Lampiran</u>	
8. Kurva kalibrasi larutan seri logam Cu untuk penentuan nilai b dan K	64
9. Kurva kalibrasi larutan seri logam Zn untuk penentuan nilai b dan K	65
10. Kurva kalibrasi larutan standar logam Cu untuk penetapan nilai b dan K serta Cu Tersedia	76
11. Kurva kalibrasi larutan standar logam Zn untuk penetapan nilai b dan K serta Zn tersedia.....	77

12.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	80
13.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1).....	80
14.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2).....	81
15.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	81
16.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1)	82
17.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2)	82
18.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0).....	83
19.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1)	83
20.	Isotermal Langmuir b_{Cu} dan K_{Cu} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2)	84
21.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	84
22.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1).....	85
23.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah tanpa logam berat (S_0) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2).....	85

24.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	86
25.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1)	86
26.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi rendah (S_1) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2)	87
27.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan tanpa biochar tongkol jagung (B_0)	87
28.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 5 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_1)	88
29.	Isotermal Langmuir b_{Zn} dan K_{Zn} pada tanah logam berat konsentrasi tinggi (S_2) dan 10 Mg ha ⁻¹ biochar tongkol jagung (B_2)	88
30.	Uji korelasi b_{Cu} dengan Cu tersedia	95
31.	Uji korelasi b_{Cu} dengan Zn tersedia	95
32.	Uji korelasi b_{Cu} dengan pH tanah	96
33.	Uji korelasi b_{Cu} dengan KTK tanah	96
34.	Uji korelasi b_{Cu} dengan kadar liat	97
35.	Uji korelasi b_{Cu} dengan C-organik tanah	97
36.	Uji korelasi K_{Cu} dengan Cu tersedia	98
37.	Uji korelasi K_{Cu} dengan Zn tersedia	98
38.	Uji korelasi K_{Cu} dengan pH tanah	99
39.	Uji korelasi K_{Cu} dengan KTK tanah	99

- 40. Uji korelasi K_{Cu} dengan kadar liat 100
- 41. Uji korelasi K_{Cu} dengan C-organik tanah..... 100

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri semakin pesat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Pertumbuhan industri dapat meningkatkan kesejahteraan nasional. Namun, dengan bertambahnya jumlah industri, meningkat pula jumlah limbah industri yang dihasilkan. Industri juga banyak menggunakan bahan kimia yang menjadi salah satu komponen limbah industri yang dapat menyebabkan pencemaran tanah. Peningkatan perkembangan industri di masa yang akan datang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan karena adanya limbah industri yang mencemari tanah maupun air sungai. Salah satu sumber pencemaran tanah yang menjadi perhatian khusus yaitu logam berat. Sebagian besar logam berat di dalam larutan tanah dapat menjadi ion bebas sehingga membahayakan kesehatan makhluk hidup (Zwolak, 2019).

Limbah industri memegang peranan paling penting dalam kontribusinya terhadap pencemaran terutama pencemaran logam berat. Logam berat dapat menyebar pada tanah, air, udara, dan makhluk hidup melalui rantai makanan. Logam berat bersifat *non-biodegradable* karena sifat kimianya yang tidak mudah terurai oleh mikroorganisme dalam lingkungan. Logam berat yang terdapat di lingkungan dapat bersifat toksik atau racun apabila melebihi batas ambang seperti logam berat Cu dan Zn (Salam dkk., 2000). Logam berat yang melebihi ambang batas dapat menimbulkan efek gangguan terhadap kesehatan manusia akibat paparan logam berat (Indirawati, 2017).

Pencemaran tanah oleh logam berat dapat menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi maksimum dan konstanta energi adsorpsi di dalam tanah. Kapasitas adsorpsi maksimum menggambarkan banyaknya adsorbat yang dapat terakumulasi pada permukaan adsorben secara maksimum (Asnawati dkk., 2017). Konstanta energi adsorpsi menggambarkan kekuatan koloid tanah dalam menjepit ion dari larutan tanah (Nursyamsi dkk., 2007). Pencemaran tanah oleh logam berat pada tanah masam akan menyebabkan penurunan pH tanah karena logam berat mudah terlarut di dalam tanah (Rahamtina dan Titah, 2022). Penurunan pH tanah juga akan mempengaruhi KTK tanah yang dapat mengurangi kemampuan tanah dalam menyimpan dan mempertukarkan kation (Sahfitra, 2023). Penurunan pH dan KTK pada tanah yang bersifat masam akan mempengaruhi kelarutan logam berat menjadi tinggi karena kation-kation logam berat dari kompleks jerapan tanah menuju ke larutan tanah sehingga kelarutan dan mobilitas logam berat meningkat (Shofiyani dan Gusrizal, 2006). Logam berat seiring waktu dapat terlepas ke larutan tanah melalui proses desorpsi dan pelarutan dari kompleks jerapan tanah (Salam dkk., 2021). Konsentrasi pencemaran logam berat yang tinggi dapat menggeser keseimbangan adsorpsi di dalam tanah. Dengan demikian, kandungan logam berat yang berlebih di dalam larutan tanah akan diserap oleh akar tanaman sehingga logam berat terakumulasi dalam tanaman (Kurnia, 2023).

Konsentrasi pencemaran logam berat yang tinggi di dalam tanah dapat mengalami penurunan dengan menggunakan biochar. Biochar merupakan material padat yang mengandung banyak karbon yang dibuat dengan membakar bahan organik atau biomassa secara pirolisis dengan suhu yang tinggi (Subarkhah dan Titah, 2023). Biochar bisa dibuat dari limbah pertanian seperti tongkol jagung yang dapat dijadikan sebagai bahan untuk memperbaiki kualitas tanah yang telah tercemar logam berat. Tongkol jagung mengandung 40-44% selulosa, 31-33% hemiselulosa, 16-18% lignin dan 3-5% abu (Wang dkk., 2011). Kandungan tersebut dapat digunakan sebagai bahan pengikat logam berat karena bahan-bahan tersebut mengandung gugus karboksil ($-\text{COOH}$) dan gugus hidroksil ($-\text{OH}$), gugus fenolik, dan lainnya (Ibbet dkk., 2006). Gugus tersebut dapat mengikat kation-kation logam berat seperti Cu^{2+} dan Zn^{2+} serta mengurangi konsentrasi ion H^{+} di

dalam larutan tanah. Biochar memiliki gugus fungsional pada permukaan biochar mampu menjerap Cu^{2+} , Zn^{2+} , dan H^+ pada tanah masam yang tercemar logam berat sehingga biochar mampu meningkatkan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat (Heryani dkk., 2018). Peningkatan dosis karbon aktif tongkol jagung dengan permukaan yang luas, dapat terjadi peningkatan nilai kapasitas adsorpsi sehingga nilai konstanta energi jerap juga mengalami peningkatan terhadap logam berat di dalam larutan tanah (Viviani dkk., 2021). Hal tersebut dikarenakan dengan meningkatnya jumlah adsorben akan meningkatkan jumlah sisi aktif biochar sehingga kapasitas adsorpsi menjadi maksimum. Apabila jumlah adsorben tinggi maka kapasitas adsorpsi akan maksimum. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan nilai konstanta energi adsorpsi akibat logam berat dalam larutan tanah (Sylvia dkk., 2022).

Penggunaan biochar dapat menaikkan pH yang rendah yang akan mempengaruhi peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) di dalam tanah. Peningkatan KTK tanah juga dapat mempengaruhi peningkatan ketersediaan unsur hara untuk tanaman sehingga kesuburan tanah meningkat yang akan mempengaruhi kapasitas dan energi jerap tanah (Salam dkk., 2022). Damris dan Ngajito, (2021) dalam penelitiannya menyatakan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum dapat meningkat oleh biochar yang memiliki muatan negatif dalam jumlah yang besar sehingga dapat meningkatkan kapasitas jerap tanah terhadap logam berat Cu dan Zn. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan menggunakan biochar tongkol jagung agar mampu meningkatkan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat Cu dan Zn sehingga dapat menurunkan konsentrasi Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Apakah perlakuan biochar tongkol jagung berpengaruh terhadap konsentrasi Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat Cu dan Zn?
2. Apakah perlakuan biochar tongkol jagung dapat mempengaruhi kapasitas dan energi jerap pada tanah tercemar logam berat Cu dan Zn?

3. Apakah terdapat korelasi antara kapasitas dan energi jerap tanah dengan beberapa sifat pada tanah?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mempelajari pengaruh biochar tongkol jagung terhadap konsentrasi Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat Cu dan Zn.
2. Mempelajari pengaruh biochar tongkol jagung terhadap perubahan kapasitas dan energi jerap pada tanah tercemar logam berat Cu dan Zn.
3. Mempelajari korelasi antara kapasitas dan energi jerap tanah dan biochar tongkol jagung terhadap beberapa sifat tanah.

1.4 Kerangka Pemikiran

Tanah memiliki berbagai unsur salah satunya logam termasuk logam berat. Sejak 26 tahun lalu tanah di Sidosari telah mengalami pencemaran tanah oleh logam berat dari PT *Star Metal Ware Industry*, Jakarta. Limbah industri tersebut mengandung Cu 754 mg kg^{-1} dan Zn $44,5 \text{ mg kg}^{-1}$ dengan pH 7,30 serta bertekstur liat (Salam dkk., 1998). Pencemaran tanah oleh logam berat Cu dan Zn yang berasal dari limbah industri dengan konsentrasi rendah yaitu 15 Mg ha^{-1} masih berada di bawah batas ambang. Berdasarkan hal tersebut, logam berat Cu dan Zn dapat menjadi sumber unsur hara mikro yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah sedikit. Tanaman memerlukan unsur hara makro dan unsur hara mikro dalam kadar yang sama walaupun unsur hara mikro cenderung dibutuhkan sedikit dibandingkan dengan unsur hara makro. Unsur hara mikro memiliki peranan penting dalam metabolisme karena dapat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Hasyiyati dkk., 2023).

Pada tanah penelitian jangka panjang yang terletak di Sidosari sejak 25 tahun yang lalu, ketersediaan logam berat Cu pada tanah S_0 (kontrol) sebesar $39,60 \text{ mg kg}^{-1}$ dan logam Zn $31,33 \text{ mg kg}^{-1}$. Pada tanah S_1 (konsentrasi rendah) ketersediaan logam Cu sebesar $38,20 \text{ mg kg}^{-1}$ dan Zn $34,33 \text{ mg kg}^{-1}$. Sementara itu, tanah S_2

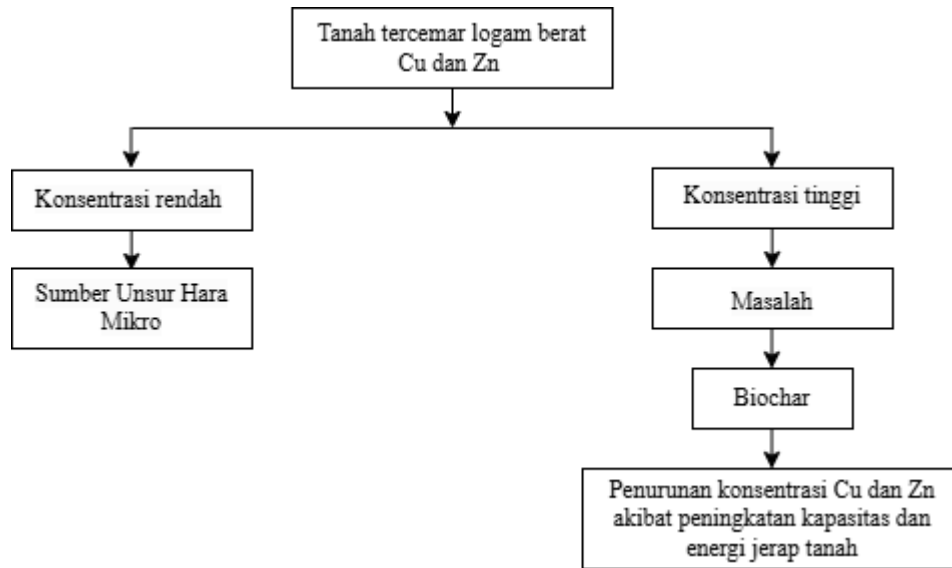
mengandung ketersediaan logam berat Cu sebesar 81,20 mg kg⁻¹ dan Zn 67,60 mg kg⁻¹. Hal tersebut menunjukkan bahwa tanah S₀, S₁, dan S₂ mengandung ketersediaan logam Cu yang melebihi batas ambang menurut *World Health Organization* (WHO) menetapkan batas maksimal kandungan logam berat Cu dalam tanah sebesar 36 mg kg⁻¹. Ketersediaan logam Zn masih berada di bawah batas ambang pada tanah S₀ dan S₁, sedangkan pada tanah S₂ melebihi batas ambang dalam *World Health Organization* (WHO) menetapkan batas maksimal kandungan logam berat Zn dalam tanah sebesar 50 mg kg⁻¹ (Ogundele dkk., 2015). Hal tersebut menunjukkan bahwa tanah S₂ (tanah dengan konsentrasi tinggi) menjadi masalah apabila keberadaannya melebihi batas maksimal di dalam tanah. Limbah industri yang hanya dibiarkan di lingkungan dengan kandungan logam berat yang tinggi dapat bersifat racun (toksik) apabila melampaui ambang batas tertentu di dalam tanah karena dapat menurunkan kualitas dan produktivitas tanah, penurunan aktivitas mikroba tanah dan membuat tanah menjadi tercemar logam berat (Abdu dkk., 2017). Kandungan logam berat jenis Cu dan Zn apabila melebihi batas maksimal tersebut dapat mencemari tanah dan bersifat toksik bagi tanaman dan hewan (Salam, 2017). Keberadaan logam berat yang tinggi juga dapat mengganggu proses penyerapan di dalam tanah. Konsentrasi logam berat yang tinggi dapat membuat jaringan organisme hidup mengalami kerusakan organ yang parah, gangguan neurologis, dan pada akhirnya mati (Pakpahan, 2019). Maka dari itu, semakin tingginya kandungan logam berat pada lingkungan akan menyebabkan tingginya kandungan logam berat yang terakumulasi dalam tubuh makhluk hidup sehingga harus diatasi dengan baik.

Penambahan biochar menjadi alternatif yang dapat mengurangi pencemaran logam berat pada tanah karena adanya peningkatan pH tanah dan bahan organik tanah sehingga kapasitas tukar kation (KTK) dalam tanah juga meningkat. Sejalan dengan penelitian Salam (2017), biochar dapat meningkatkan pH tanah karena meningkatnya gugus fungsi hidroksil (-OH) yang dapat bereaksi dengan ion H⁺ di dalam larutan tanah. Biochar juga memiliki kemampuan dalam meminimalisasi logam berat pada tanah tercemar dengan menurunkan secara nyata penyerapan logam berat oleh tanaman sehingga dapat memperbaiki tanah yang tidak produktif atau terdegradasi serta meningkatkan kualitas lingkungan (Ippolito dkk., 2012).

Salah satunya jenis biochar yang paling optimum dalam mengurangi kadar logam berat yaitu biochar tongkol jagung yang mengandung lignin, selulosa, hemiselulosa, dan abu (Subarkhah dan Titah, 2023). Menurut penelitian Rokhati dkk (2021), kandungan dari biochar tongkol jagung dapat digunakan sebagai adsorben ion logam berat. Biochar tongkol jagung dapat menjadi adsorben ion logam berat karena kandungan karbon yang besar, luas permukaan yang besar, morfologi yang porous, dan gugus fungsional yang dapat mengurangi ketersediaan logam berat di dalam tanah (Hidayat, 2015).

Pemanfaatan biochar tongkol jagung pada tanah tercemar dapat menghilangkan keaktifan ion-ion logam berat Cu dan Zn karena adanya proses adsorpsi kation logam berat yang akan meningkatkan pH tanah karena meningkatnya muatan negatif (OH^-) sehingga mempengaruhi peningkatan KTK tanah. Luas permukaan biochar tongkol jagung dapat mempengaruhi pengikatan kation dan anion dalam larutan tanah (Rawat dkk., 2019). Disisi lain, sejalan dengan penelitian Houben (2013), pengaruh adsorpsi dengan berbagai biochar terhadap pencemaran senyawa logam berat, ditunjukkan bahwa daya jerap tanah terhadap ion logam berat meningkat dengan pertambahan biochar. Hal tersebut menunjukkan semakin tinggi dosis adsorben yang diberikan, maka akan semakin meningkat kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat Cu dan Zn.

Menurut penelitian Ningsih dkk (2016), penggunaan biochar tongkol jagung dapat menurunkan kandungan logam berat timbal sebesar 58,68 ppm dengan berat arang tongkol jagung 40 mg dan presentase logam berat timbal yang terserap yaitu 94,70%. Hal tersebut terjadi karena adanya proses kesetimbangan laju adsorpsi disertai dengan terjadinya peristiwa desorpsi. Gugus-gugus fungsional semakin banyak dalam biochar maka semakin tinggi biochar dalam mengikat kation-kation logam berat sehingga terjadi penurunan konsentrasi Cu dan Zn yang melebihi ambang batas akibat adanya peningkatan kapasitas dan energi jerap di dalam tanah (Martina dkk., 2016). Kerangka pemikiran pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran pengaruh kapasitas dan energi jerap terhadap Cu dan Zn pada logam berat akibat perlakuan biochar tongkol jagung

1.5 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Terjadi penurunan konsentrasi Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat Cu dan Zn akibat perlakuan biochar tongkol jagung.
2. Terjadi peningkatan kapasitas dan energi jerap pada tanah tercemar logam berat Cu dan Zn akibat perlakuan biochar tongkol jagung.
3. Adanya korelasi antara kapasitas dan energi jerap terhadap beberapa sifat tanah pada tanah tercemar logam berat Cu dan Zn.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Tanah akibat Logam Berat Cu dan Zn

Limbah industri yang mengandung logam berat merupakan salah satu sumber pencemaran tanah. Limbah industri mempunyai kandungan logam berat yang berbahaya bagi lingkungan seperti ion logam berat Cd, Cu, Cr, Ni, Pb dan Zn. Logam berat akan menjadi berbahaya apabila melebihi batas ambang dan juga dibutuhkan bagi makhluk hidup, namun dalam jumlah yang sedikit. Adanya pencemaran tanah yang melebihi batas ambang dan tidak dikelola dengan baik akan berdampak buruk bagi makhluk hidup (Danarto, 2007).

Logam berat merupakan bahan pencemar yang tidak dapat terurai dan dapat terakumulasi pada lingkungan sedimen dan organisme. Logam berat dapat menjadi berbahaya bagi makhluk hidup apabila berlebihan seperti Cu dan Zn. Keberadaan logam berat di dalam tanah yang berlebih dapat menghambat proses penyerapan unsur hara oleh tanaman. Apabila penyerapan unsur hara terhambat, maka tanaman tidak dapat tumbuh secara optimal (Sandi, 2023).

Pencemaran logam berat juga dapat berdampak buruk bagi manusia apabila terikat di dalam tubuh sehingga metabolisme tubuh akan terganggu. Logam berat dapat menyebabkan alergi, mutagen, dan karsinogen yang masuk melalui kulit, nafas, dan juga pencernaan (Hamzah, 2019). Tembaga dan seng merupakan mikronutrien esensial yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah kecil, tetapi apabila di dalam tanah tersedia dalam jumlah yang banyak menyebabkan keracunan (Khasanah, 2021).

2.2 Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap oleh Biochar

Kapasitas jerap tanah merupakan kemampuan tanah dalam menyerap atau menahan logam dari larutan tanah. Energi jerap tanah memiliki arti energi yang dibutuhkan atau dilepaskan saat logam diserap oleh tanah dengan adanya interaksi antara ion logam dan permukaan koloid tanah. Penggunaan biochar merupakan alternatif atau solusi karena memiliki luas permukaan koloid yang besar. Permukaan koloid yang besar dapat lebih banyak menjerap ion-ion positif dalam larutan tanah yang tercemar logam berat yang dapat berpotensi mengurangi bioavailabilitas dan lindi logam berat melalui proses adsorpsi. Kapasitas dan energi jerap tanah dipengaruhi oleh C-organik, pH tanah, kapasitas tukar kation (KTK), dan kadar liat (Hidayat, 2015).

C-organik tanah merupakan faktor penting yang menentukan kualitas tanah mineral. Biochar merupakan salah satu bahan organik pembenah tanah tercemar akibat logam berat yang mengandung banyak karbon, bersifat resisten dan dibuat dari pembakaran biomassa tanaman secara pirolisis atau tanpa oksigen. Karbon dari biochar dapat menjadi sumber makanan dan habitat mikroorganisme tanah, sehingga keberadaan C-organik tanah dapat memacu kegiatan mikroorganisme meningkat dalam proses dekomposisi yang menghasilkan enzim yang bermanfaat untuk pertumbuhan tanaman (Azka dkk., 2023). Biochar memiliki karbon yang tinggi dari pembakaran secara pirolisis yang dapat meningkatkan pH tanah (Mautuka dkk., 2022). Pemberian bahan organik seperti biochar juga dapat meningkatkan daya jerap dan kapasitas tukar kation (KTK). Hal tersebut sejalan dengan Krull dkk., (2009) yang menyatakan bahwa nilai C-organik memiliki korelasi positif yang kuat dengan KTK tanah.

Nilai pH tanah dapat menunjukkan konsentrasi hidrogen (H^+) dan (OH^-) di dalam tanah (Kusuma dan Yanti, 2021). Chlopecka dkk., (1996) melaporkan bahwa besarnya pencemaran Pb, Cd, dan Zn secara jelas dipengaruhi oleh perubahan pH tanah. Pada $pH < 5,6$, kandungan Pb, Cd, dan Zn lebih banyak dalam bentuk yang dapat dipertukarkan dibandingkan dengan $pH > 5,6$. Kisaran pH netral sampai agak alkalis dapat mempengaruhi kapasitas adsorpsi tanah karena tanah pada pH

tersebut akan menurunkan adsorben dalam mengadsorpsi ion logam berat dan membentuk senyawa hidroksida yang bersifat basa lemah sehingga pH tanah pun meningkat. Menurut Schulin (1995), penurunan pH tanah dapat menurunkan kekuatan ikatan ion logam dan meningkatkan mobilitas ion logam di dalam tanah sehingga memungkinkan ion logam akan menjadi lebih terikat kuat pada tanah dengan pH yang lebih tinggi. Logam berat di dalam tanah juga dapat dijerap oleh partikel tanah maupun bahan organik melalui ikatan koordinasi ataupun ikatan elektrostatik sehingga ketersediaan logam berat di dalam tanah berbeda-beda. Menurut Hardjowigeno (2007), kandungan bahan organik mampu meningkatkan nilai KTK tanah, sehingga dapat menurunkan konsentrasi logam berat.

Kapasitas tukar kation (KTK) tanah merupakan kemampuan koloid tanah dalam menjerap dan mempertukarkan kation. Kapasitas tukar kation yang meningkat menyebabkan kation logam berat Cu dan Zn dapat dijerap oleh permukaan biochar (Putri dkk., 2019). Kadar liat berpengaruh dalam proses penjerapan ion logam karena semakin tinggi kadar liat tanah maka semakin tinggi pori-pori mikro dibandingkan pori-pori makro sehingga pada pori mikro ion logam berat akan mudah dijerap oleh permukaan biochar sehingga dapat menurunkan konsentrasi Cu dan Zn yang berlebih (Jury, 1991). Selain itu, peningkatan kadar liat dapat meningkatkan KTK tanah.

Struktur kandungan biochar seperti selulosa, lignin, dan hemiselulosa, biochar memiliki potensi yang besar sebagai penjerap karena adanya gugus hidroksil (-OH) yang dapat mengikat logam berat yang tercemar pada tanah. Penjerapan logam berat dapat terjadi dengan mengikat kation-kation oleh gugus hidroksil (-OH). Menurut data penelitian Ningsih dkk (2016) diperoleh hasil bahwa adanya penyerapan logam berat timbal (Pb) sebesar 58,68 ppm adalah 40 mg dan presentase logam berat timbal yang terserap yaitu 94,70% oleh arang tongkol jagung. Hal tersebut menunjukkan adanya kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat timbal (Pb).

2.3 Peran Biochar Tongkol Jagung dalam Menurunkan Logam Berat Cu dan Zn

Biochar merupakan produk hasil limbah biomassa yang dipanaskan tanpa udara atau dengan udara sedikit (*pyrolysis*). Penggunaan biochar di Indonesia memiliki potensi cukup besar yang bisa memanfaatkan bahan baku pembuatan biochar seperti tempurung kelapa, residu kayu, kulit buah kakao, tongkol jagung, sekam padi, dan lainnya. Aplikasi biochar pada lahan pertanian berfungsi sebagai bahan pembenah tanah yang mampu memperbaiki sifat kimia tanah seperti pH, kapasitas tukar kation, N-total, P-tersedia dan Al-dd. Biochar juga dapat meningkatkan kapasitas dan energi jerap tanah (Nurida, 2014).

Menurut data Badan Pusat Statistik (2023), produksi jagung di Indonesia pada tahun 2023 diperkirakan rata-rata sebanyak 14.460.601 ton dan produksi jagung di Provinsi Lampung tahun 2023 sekitar 1.103.357 ton. Dari produksi jagung di Lampung, tongkol jagung menjadi salah satu limbah yang dijadikan sebagai pakan ternak, dibiarkan di ladang, dibakar, dan dibuang sia-sia (Achmad dkk., 2023). Hal tersebut dapat menjadi masalah pencemaran lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Limbah tongkol jagung bisa menjadi alternatif sebagai bahan untuk memperbaiki tanah tercemar dengan diolah terlebih dahulu menjadi biochar, yang efektif dalam menurunkan bahaya logam berat.

Jagung merupakan salah satu bahan pangan yang melimpah di Indonesia. Produksi jagung di Indonesia setiap tahunnya juga menunjukkan peningkatan. Peningkatan jumlah yang dikonsumsi menyebabkan bertambahnya limbah tongkol jagung yang berpotensi mencemari lingkungan. Salah satu upaya dalam memanfaatkan limbah jagung yaitu diolah menjadi karbon aktif yang selanjutnya dapat diaplikasikan pada tanah sebagai adsorben. Tongkol jagung memiliki senyawa karbon yang tinggi yaitu selulosa (41%) dan hemiselulosa (36%) serta lignin (16%), yang berpotensi sebagai bahan biomassa karbon. Kandungan biochar tongkol jagung tersebut dapat menurunkan ion logam berat yang terdapat di dalam tanah tercemar logam berat Cu dan Zn. Selain itu, biochar tongkol jagung juga memiliki beberapa kelebihan di antaranya memiliki potensi yang baik

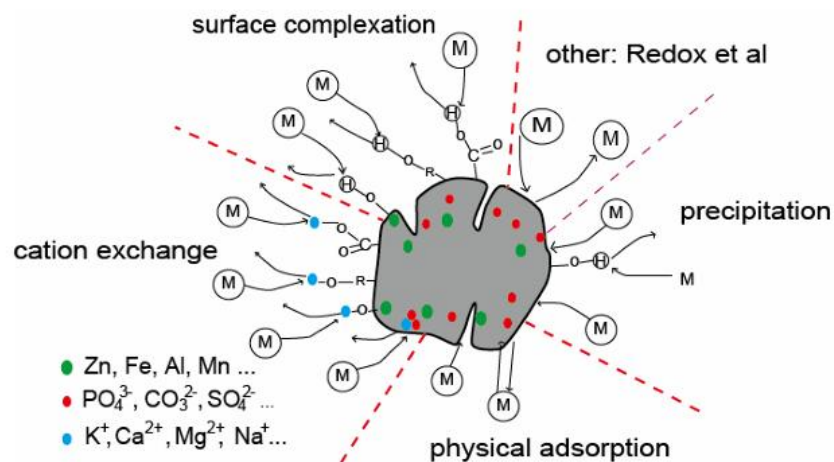
sebagai adsorben karena karbonnya lebih besar daripada kadar abunya, mudah dibuat, murah, bahan baku mudah didapatkan, mudah digunakan, dan tahan lama (Rizkyi, 2016).

Berdasarkan prinsip kimia, larutan standar Cu dan Zn 100 ppm dapat bersifat kompetitif atau berkompetisi dalam penjerapan oleh biochar tongkol jagung. Mekanisme penjerapan terjadi karena kedua ion logam Cu^{2+} dan Zn^{2+} memiliki muatan positif yang sama dan bersaing untuk menempati situs aktif yang bermuatan negatif pada permukaan biochar seperti gugus karboksil dan hidroksil (Alatawi, 2024). Kation logam Cu memiliki radius ionik lebih kecil dan elektronegativitas lebih tinggi dibandingkan kation Zn. Hal tersebut logam Cu membentuk ikatan kovalen yang lebih kuat dengan gugus fungsional pada permukaan koloid ataupun biochar sehingga afinitas Cu^{2+} lebih besar dibandingkan dengan Zn^{2+} (Sparks, 2003).

Biochar tongkol jagung mengandung gugus fungsional yaitu hidroksil (-OH) dan gugus karboksil (-COOH). Gugus fungsional pada biochar tongkol jagung dapat mengikat ion logam seperti Cu^{2+} dan Zn^{2+} . Dilihat dari struktur kimianya, selulosa, lignin dan hemiselulosa mempunyai potensi yang besar sebagai penjerap karena gugus -OH yang terikat dapat berinteraksi dengan komponen adsorbat seperti logam berat sehingga pada permukaan biochar tongkol jagung dapat menjerap kation-kation logam berat yang dapat menurunkan konsentrasi berlebih pada tanah tercemar logam berat (Ningsih dkk., 2016).

Adapun mekanisme penjerapan logam berat oleh biochar diantaranya pertukaran ion dan adsorpsi fungsi kationik π , presipitasi, kompleksasi, dan penjerapan elektrostatis. Sifat pertukaran ion adalah interaksi elektrostatis antara gugus muatan negatif pada permukaan biochar dan muatan positif di dalam tanah. Semakin besar jumlah pertukaran kation, semakin kuat retensi logam berat pada biochar (Wang dkk, 2018). Adsorpsi fungsi kationik π bergantung pada aromatisasi biochar, semakin banyak struktur aromatik konjugat π , maka semakin besar muatan negatif (Li dkk., 2017). Presipitasi atau pengendapan dapat terjadi

karena adanya reaksi ion logam berat dengan $-OH$ yang membentuk hidroksida sehingga efektif dalam memadatkan polutan logam berat. Kompleksasi proses penting untuk adsorpsi logam berat dengan afinitas yang kuat. Penjerapan elektrostatis dipengaruhi oleh luas permukaan yang besar dan energi yang lebih tinggi sehingga biochar mampu menyerap logam berat dengan kuat dan mengurangi kelarutan logam berat di dalam tanah (Gambar 2).



Gambar 2. Mekanisme adsorpsi logam berat oleh biochar (Li dkk., 2017)

2.4 Pengaruh Biochar terhadap Kapasitas dan Energi Jerap Tanah terhadap Logam Berat

Dalam ilmu kimia, adsorpsi isoterm Langmuir banyak digunakan dalam proses adsorpsi. Persamaan Isoterm Langmuir menggunakan pendekatan kinetika yaitu proses kesetimbangan yang terjadi pada kecepatan adsorpsi dan desorpsi sama. Persamaan Isoterm Langmuir diasumsikan bahwa lapisan molekul yang teradsorpsi akan membentuk lapisan monolayer, mekanisme *chemisorption* lebih utama, tidak adanya interaksi antara molekul-molekul adsorbat, permukaan padatan bersifat homogen dan afinitas setiap lokasi untuk molekul adsorbat yang sama, dan adsorbat yang teradsorpsi pada tempat yang sudah ditentukan serta bersifat *irreversible* atau tidak dapat bergerak pada permukaan padatan (Yustinah dkk., 2019).

Kapasitas adsorpsi maksimum (b) adalah jumlah maksimum adsorbat yang diikat oleh adsorben dalam kondisi kesetimbangan, yang dinyatakan dalam satuan mg/g. Nilai b mencerminkan seberapa besar kemampuan adsorben dalam menahan adsorbat di permukaannya. Sementara itu, konstanta energi adsorpsi (K) adalah kekuatan atau afinitas antara adsorbat dan adsorben. Semakin besar nilai K , maka semakin kuat daya ikat adsorbat terhadap adsorben. Nilai b dan K dapat diperoleh dari analisis model Isoterm Langmuir dengan pendekatan linearisasi data adsorpsi (Miri dkk, 2022). Pada penelitian ini menggunakan persamaan Isoterm Langmuir untuk mempelajari mekanisme adsorpsi terhadap adsorbat. Adsorpsi dapat terjadi yang akan membentuk ikatan kompleks antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben secara kimisorpsi. Nilai b menunjukkan kapasitas dari adsorpsi ion logam Cu dan Zn pada tanah. Semakin besar nilai K pada persamaan Isoterm Langmuir maka semakin besar nilai b (Wijayanti dkk, 2018).

Persamaan Isoterm Langmuir dalam penjerapan logam berat (Zahroh, 2010) adalah sebagai berikut:

$$\frac{M}{q} = \frac{1}{Kb} + \frac{1}{b}M$$

Dengan:

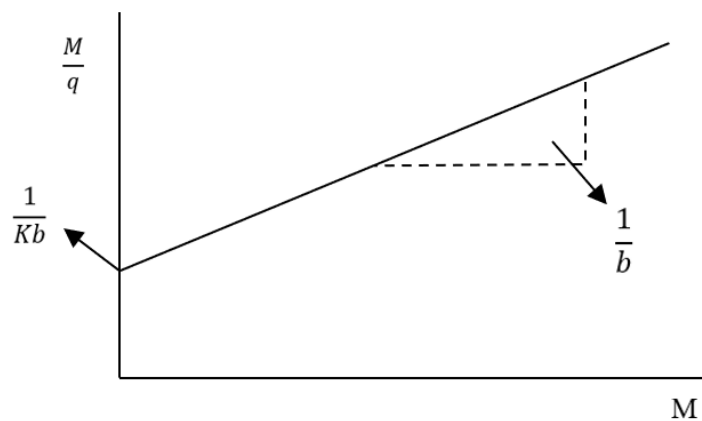
$$\frac{M}{q} = \text{Indeks Adsorpsi Logam Berat}$$

M = Konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (mg L^{-1})

K = Konstanta energi adsorpsi

b = Kapasitas adsorpsi maksimum (mg L^{-1})

q = Total logam berat teradsorpsi (mg L^{-1})



Gambar 3. Grafik Persamaan Isotermal Langmuir

Isoterm adsorpsi Langmuir didefinisikan sebagai kapasitas adsorpsi maksimum yang terjadi akibat lapisan tunggal (*monolayer*) ke permukaan dengan jumlah terbatas yang identik dan dinyatakan dalam bentuk linier sesuai persamaan Isoterm Langmuir. Metode Isoterm Langmuir menjadi salah satu cara pengelolaan logam berat Cu dan Zn dalam mengadsorpsi kation-kation. Proses adsorpsi dapat terjadi melalui beberapa mekanisme yakni pemerangkapan, pertukaran ion, ikatan hidrogen, dan pembentukan kompleks (Martell dan Hancock, 1996). Pada proses adsorpsi juga pemilihan adsorben menjadi salah satu faktor penting agar menghasilkan efisiensi pengelolaan yang cukup tinggi. Adsorben dari biochar tongkol jagung dapat dijadikan alternatif sebagai pengolahan logam berat Cu dan Zn karena memiliki gugus hidroksil (-OH) dan gugus karboksil (-COOH) (Mayangsari dan Astuti, 2021).

Adapun faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi biochar tongkol jagung terhadap kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K) yakni adsorben yang murni dan tanpa adanya kontaminan pengotor, luas permukaan dan porositas yang besar, kepolaran, temperatur, dan tekanan. Adsorben yang lebih murni atau tanpa adanya kontaminan kotor cenderung memiliki daya adsorpsi yang lebih baik. Adsorben dengan porositas yang besar dapat menyerap lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben dengan porositas kecil. Luas permukaan adsorben yang besar juga dapat menyerap logam berat Cu dan Zn lebih besar. Jumlah pori-pori mikro pada biochar akan menimbulkan

kapiler yang menyebabkan adanya daya jerap logam berat. Kekuatan interaksi adsorbat dengan adsorben dipengaruhi oleh sifat adsorbat dan adsorbennya, apabila adsorben bersifat polar, maka komponen yang bersifat polar akan terikat lebih kuat dibandingkan dengan komponen yang kurang polar. Molekul yang melekat pada permukaan adsorben akan terjadi pembebasan sejumlah energi panas, sehingga peristiwa adsorpsi tersebut disebut peristiwa eksotermis. Peningkatan tekanan adsorbat pada adsorpsi fisika dapat menaikkan jumlah adsorbat yang diadsorpsi, sedangkan pada adsorpsi kimia peningkatan tekanan adsorbat akan mengurangi jumlah adsorpsi (Prabowo, 2009).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2024 – November 2024. Penelitian ini dilaksanakan dengan mengambil contoh tanah yang tercemar logam berat di Sidosari, Natar, Lampung Selatan. Pemberian perlakuan akan dilakukan di rumah kaca atau plastik Perguruan Tinggi Al-Madani. Analisis dilakukan di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Flame Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS), pot, papan penyangga, bak (penampung air), sumbu, ayakan tanah 2 mm, erlenmeyer, botol film, botol kocok, spatula, labu ukur, gelas beaker, gelas ukur, kertas saring Whatman No.42, pH meter, timbangan, pipet volumetrik, pipet tetes, pipet skala, pH meter, hidrometer, tabung reaksi, kantung plastik, sentrifugator, *shaker*, dan kertas label. Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu biochar tongkol jagung, larutan standar Cu dan Zn 1000 ppm, larutan pengestrak 1 N HNO₃, larutan 1 N NH₄OAC pH 7, aquades, dan sampel tanah tercemar logam berat dari Sidosari.

3.3 Metode

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dan melibatkan dua faktor dengan tiga kali ulangan. Faktor pertama adalah sampel tanah yang diperlakukan Cu dan Zn dengan 3 taraf : $S_0 = 0 \text{ Mg ha}^{-1}$ atau

kontrol, $S_1 = 15 \text{ Mg ha}^{-1}$ atau konsentrasi rendah, dan $S_2 = 60 \text{ Mg ha}^{-1}$ atau konsentrasi tinggi. Faktor kedua adalah biochar tongkol jagung yaitu : $B_0 = 0 \text{ Mg ha}^{-1}$ atau 0 g pot^{-1} , $B_1 = 5 \text{ Mg ha}^{-1}$ atau $0,5 \text{ g pot}^{-1}$, dan $B_2 = 10 \text{ Mg ha}^{-1}$ atau 1 g pot^{-1} .

Berdasarkan kedua faktor perlakuan tersebut, maka diperoleh sembilan kombinasi perlakuan yaitu sebagai berikut:

1. S_0B_0 = Tanah tanpa logam berat (kontrol)+Tanpa biochar tongkol jagung.
2. S_0B_1 = Tanah tanpa logam berat (kontrol)+ 5 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung.
3. S_0B_2 = Tanah tanpa logam berat (kontrol)+ 10 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung.
4. S_1B_0 = Tanah logam berat konsentrasi rendah+Tanpa biochar tongkol jagung.
5. S_1B_1 = Tanah logam berat konsentrasi rendah+ 5 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung.
6. S_1B_2 = Tanah logam berat konsentrasi rendah+ 10 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung.
7. S_2B_0 = Tanah logam berat konsentrasi tinggi+Tanpa biochar tongkol jagung.
8. S_2B_1 = Tanah logam berat konsentrasi tinggi+ 5 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung.
9. S_2B_2 = Tanah logam berat konsentrasi tinggi+ 10 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung.

3.4 Tata Letak Satuan Percobaan

Tata letak satuan percobaan dalam penelitian ini berupa pot yang diberi tanah logam berat dan perlakuan biochar tongkol jagung yang diulang 3 kali sehingga didapatkan 27 satuan percobaan sebagai berikut (Gambar 4).

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

Gambar 4. Tata letak satuan percobaan

Keterangan: S_0 = Tanah tanpa logam berat (kontrol); S_1 = Tanah logam berat konsentrasi rendah (5 Mg ha^{-1}); S_2 = Tanah logam berat konsentrasi tinggi (60 Mg ha^{-1}); B_0 = Tanpa biochar tongkol jagung (kontrol); B_1 = 5 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung; B_2 = 10 Mg ha^{-1} biochar tongkol jagung; U = Ulangan

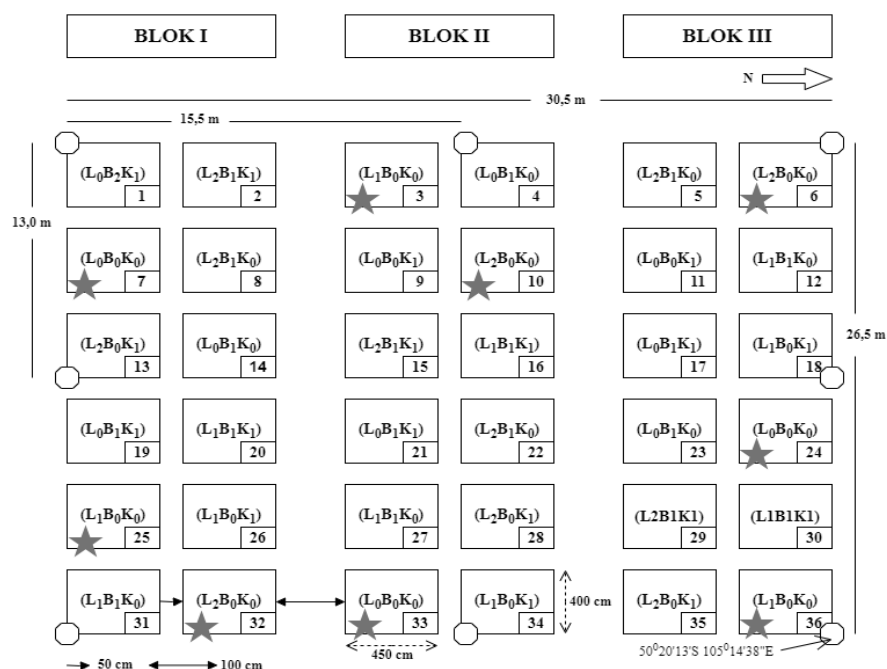
Tabel 1. Pengambilan contoh tanah di Sidosari, 1998

Tanah	Perlakuan Awal			Perlakuan
	Limbah	Kapur	Kompos	
S_0	0	0	0	$L_0B_0K_0$
S_1	15	0	0	$L_1B_0K_0$
S_2	60	0	0	$L_2B_0K_0$

Keterangan: S_0 = Tanah tanpa logam berat (kontrol); S_1 = Tanah logam berat konsentrasi rendah (5 Mg ha^{-1}); S_2 = Tanah logam berat konsentrasi tinggi (60 Mg ha^{-1}); L_0 = Tanah tanpa perlakuan limbah industri (limbah industri 0 Mg ha^{-1}); L_1 = Tanah berlogam berat konsentrasi rendah (limbah industri 15 Mg ha^{-1}); L_2 = Tanah berlogam berat konsentrasi tinggi (limbah industri 60 Mg ha^{-1}); B_0 = Kompos daun singkong 0 Mg ha^{-1} ; K_0 = Kapur 0 Mg ha^{-1}

Adapun contoh tanah (S_0 , S_1 , dan S_2) (Tabel 1) yang diambil dari petak perlakuan $L_0B_0K_0$ (untuk S_0), $L_1B_0K_0$ (untuk S_1), dan $L_2B_0K_0$ (untuk S_2) di Desa Sidosari Kecamatan Natar, Lampung Selatan. Seluruh blok telah diaplikasikan limbah

logam berat sejak 1998 dari limbah industri sendok logam yang berasal dari PT *Star Metal Ware Industry*, Jakarta. Contoh tanah diambil secara komposit dari 5 titik pada setiap petak percobaan yang terdiri dari 9 petak percobaan, kemudian dicampur rata menjadi satu atau dikompositkan, sehingga terkumpul 3 jenis contoh tanah yaitu (S_0 , S_1 , dan S_2) (Gambar 4).



Gambar 5. Tata letak percobaan di Sidosari, 1998

Keterangan : S_0 = Tanah tanpa logam berat (kontrol); S_1 = Tanah logam berat konsentrasi rendah (5 Mg ha^{-1}); S_2 = Tanah logam berat konsentrasi tinggi (60 Mg ha^{-1}); L_0 = Tanah tanpa perlakuan limbah industri (limbah industri 0 Mg ha^{-1}); L_1 = Tanah berlogam berat konsentrasi rendah (limbah industri 15 Mg ha^{-1}); L_2 = Tanah berlogam berat konsentrasi tinggi (limbah industri 60 Mg ha^{-1}); B_0 = Kompos daun singkong 0 Mg ha^{-1} ; B_1 = Kompos daun singkong 5 Mg ha^{-1} ; K_0 = Kapur 0 Mg ha^{-1} ; K_1 = Kapur 5 Mg ha^{-1} ; = Petak pengambilan contoh tanah; = Bukan petak pengambilan contoh tanah

3.5 Pelaksanaan Percobaan

3.5.1 Persiapan Sampel Tanah

Persiapan sampel tanah dilakukan dengan contoh tanah diambil pada lahan yang tercemar logam berat Cu dan Zn diatas dengan kedalaman 0-15 cm di Sidosari,

Natar, Lampung Selatan (Gambar 5). Contoh tanah diambil kemudian dikeringkan, lalu dihaluskan dengan ditumbuk, kemudian diayak menggunakan ayakan 2 mm untuk menghilangkan kerikil dan sisa tanaman. Contoh tanah disiapkan untuk 27 satuan percobaan dengan masing-masing setiap petak percobaan contoh tanah sebesar 200 g. Pada setiap satuan percobaan diberi masing-masing perlakuan sesuai dosis yang telah ditentukan (Gambar 4).

3.5.2 Penyiapan Biochar

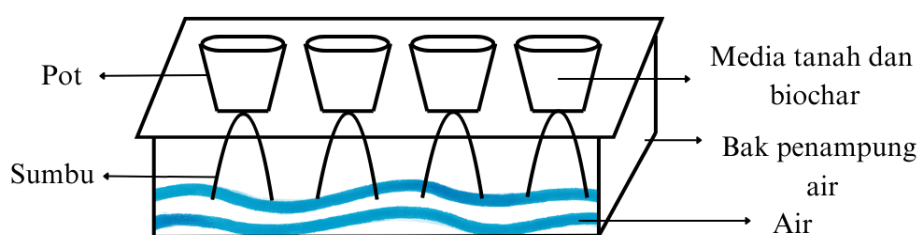
Pembuatan biochar tongkol jagung diawali dengan menyiapkan tongkol jagung, kawat ram, minyak tanah, dan pemantik api. Kawat ram digulung terlebih dahulu membentuk seperti cerobong. Tongkol jagung diletakkan di samping cerobong kawat ram dan kayu diletakkan di dalam kawat ram yang dituangi minyak tanah secukupnya, serta dibakar menggunakan pemantik api. Selanjutnya, api dibiarkan menyala dengan mengeluarkan asap dari pembakaran tongkol jagung, sesekali tongkol jagung dibalikkan sampai pembakaran jagung berwarna hitam seperti arang. Jika tongkol jagung telah terbakar secara keseluruhan, maka bahan tersebut disiram sedikit air untuk mematikan api dan dibiarkan sampai dingin, kemudian tongkol jagung dihaluskan dan disaring dengan ayakan 2 mm (Mautuka dkk., 2022).

3.5.3 Pengaplikasian Biochar Tongkol Jagung dan Inkubasi

Biochar tongkol jagung diaplikasikan pada setiap satuan percobaan yang berupa pot yang berisi tanah tercemar logam berat Cu dan Zn dengan konsentrasi yang berbeda. Biochar tongkol jagung diaplikasikan ke dalam tanah tercemar logam berat dengan dosis biochar tongkol jagung 0 Mg ha⁻¹ (B₀), biochar tongkol jagung 5 Mg ha⁻¹ (B₁), dan biochar tongkol jagung 10 Mg ha⁻¹ (B₂) ke dalam 200 g tanah yang berada dalam pot dengan mencampurkan biochar tersebut dengan merata. Pencampuran tanah dan biochar dilakukan di atas lembaran plastik bersih sebelum dimasukkan ke dalam pot percobaan. Tanah yang sudah tercampur dengan biochar dimasukkan ke dalam pot percobaan, kemudian campuran tersebut diinkubasi di rumah kaca selama 4 pekan dengan pemantauan setiap hari.

3.5.4 Pengairan Contoh Tanah

Contoh tanah dan biochar dilakukan dengan metode pengairan secara kapiler menggunakan kain sumbu yang menghubungkan contoh tanah dan biochar dengan tampungan air. Air yang meresap pada kain sumbu akan naik ke contoh tanah sehingga tanah selalu dalam keadaan kapasitas lapang. Air dalam bak penampungan dipantau dan diperhatikan volume airnya jika volume air sudah berkurang maka dilakukan penambahan air agar tanah tetap dalam keadaan kapasitas lapang (Gambar 6).



Gambar 6. Pengairan contoh tanah secara kapiler

3.5.5 Pengambilan Contoh Tanah Setelah Inkubasi 4 Pekan

Pengambilan contoh tanah dilakukan pada campuran tanah dan biochar setelah 4 pekan. Contoh tanah diayak menggunakan ayakan 2 mm setelah dikeringudarkan, kemudian dianalisis kapasitas dan energi jerap tanah, Cu dan Zn tersedia, pH tanah, KTK tanah, C-organik, dan kadar liat.

3.5.6 Analisis Tanah

Analisis tanah dilakukan di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung, mencakup kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K), Cu dan Zn tersedia, pH tanah, KTK tanah, C-organik dan kadar liat setelah diberi perlakuan.

Tabel 2. Parameter analisis tanah

Parameter	Metode Analisis
Kapasitas adsorpsi maksimum (b)	Isotermal Langmuir
Konstanta energi adsorpsi (K)	Isotermal Langmuir
Cu dan Zn tersedia	Pengektrak 1 N HNO ₃ diukur dengan AAS
pH tanah	pH meter
KTK tanah	1 N NH ₄ OAc pH 7
C-organik	<i>Walkey and Black</i>
Kadar liat	Hidrometer

3.5.7 Analisis Data

Analisis data yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K) yang diperoleh dari analisis di UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung. Data pendukung yang akan digunakan yaitu Cu dan Zn tersedia, pH tanah, KTK tanah, C-organik dan kadar liat juga diperoleh dari analisis di laboratorium Ilmu Tanah. Data yang diperoleh diuji dengan SEM (*Standard Error of The Mean*) untuk membandingkan antar perlakuan. Untuk mengetahui hubungan antara Cu dan Zn tersedia, pH tanah, KTK tanah C-organik, dan kadar liat dengan kapasitas dan energi jerap tanah dapat dilakukan uji korelasi.

3.5.8 Penetapan Nilai b dan K dengan Persamaan Langmuir

Langkah pertama dalam penetapan nilai b dan K dengan menimbang sebanyak 2 g contoh tanah setara BKO dimasukkan ke dalam botol sentrifugasi, ditambahkan Larutan logam berat Cu dan Zn dengan konsentrasi 0, 5, 10,15, dan 20 ppm, kemudian dikocok dengan *end to end shaker* selama 2 jam. Campuran tanah logam berat lalu disaring dengan menggunakan kertas Whatman. Konsentrasi logam berat dalam supernatan (M) ditentukan dengan *flame* AAS. Persamaan Langmuir ditentukan dengan aplikasi *Microsoft Excel*, untuk mengetahuinya hitung b dan K dengan teliti.

Sebelumnya dibuat stok larutan standar untuk percobaan 100 ppm Cu dan 100 ppm Zn dengan memasukkan 100 ml larutan baku Cu dan Zn ke dalam labu volumetri 1000 ml yang ditera dengan air murni dan dihomogenkan. Untuk menentukan nilai b dan K setiap satuan percobaan, ditimbang 2 g contoh tanah ke dalam botol pengocok ukuran 25 ml (berat tanah dikonversi sesuai kadar air). Masing-masing botol pengocok ditambahkan contoh tanah dan larutan sebagai berikut (Tabel 3).

Tabel 3. Pencampuran contoh tanah dengan larutan logam

Berat Tanah (g BKO)	Konsentrasi Awal C (ppm)	Larutan Standar 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 tanah dan larutan dicampurkan, kocok dengan *end-to-end shaker* selama 2 jam. Setelah itu, didiamkan beberapa saat dan fraksi cair dipisahkan dengan penyaringan menggunakan kertas Whatman. Konsentrasi logam berat terkait dengan supernatan (M dalam ppm) ditentukan dengan menggunakan *flame AAS*. Pengukuran lainnya dilakukan pada setiap satuan percobaan sampai selesai. Untuk menentukan nilai b dan K, dilakukan penentuan isoterm Langmuir dengan menggunakan *Microsoft Excel* (Tabel 4).

Penentuan isoterm Langmuir:

$$M = x \text{ (mg L}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

Keterangan:

M = Konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (mg L⁻¹)

x = Konsentrasi logam berat dalam larutan (mg L⁻¹)

$$q_1 = C-M \text{ (mg L}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

Keterangan:

q_1 = Kapasitas adsorpsi maksimum logam berat oleh adsorben (mg L⁻¹)

C = Konsentrasi awal (mg L⁻¹)

M = Konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (mg L⁻¹)

$$q = 10 \times q_1 \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Keterangan:

q = Total logam berat teradsorpsi (mg kg⁻¹)

q_1 = Kapasitas adsorpsi maksimum logam berat oleh adsorben (mg L⁻¹)

$$\frac{M}{q} = y \quad (4)$$

Keterangan:

$\frac{M}{q}$ = Indeks adsorpsi logam berat

y = Jumlah logam berat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (mg L⁻¹)

$$y = a+zx \quad (5)$$

Keterangan:

y = Jumlah logam berat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (mg L⁻¹)

a = Intersep pada sumbu y

z = Koefisien kemiringan garis (slope)

x = Konsentrasi logam berat dalam larutan (mg L⁻¹)

Tabel 4. Penentuan Isoterm Langmuir $y=a+zx$

Konsentrasi Awal (C) mg L ⁻¹	M=x (mg L ⁻¹)	q_1 (C-M) mg L ⁻¹	q (10 × q_1) (mg kg ⁻¹)	M/q=y	Isotermal Langmuir (y=a+zx)
0					
5					
10					
15					
20					

Perhitungan nilai b dan K dilakukan dengan aplikasi Excel dan dilengkapi nilai perbedaan berdasarkan analisis statistika.

$$z = 1/b \quad (6)$$

Keterangan:

z = Koefisien kemiringan garis (slope)

b = Kapasitas adsorpsi maksimum

$$b = 1/z \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

Keterangan:

b = Kapasitas adsorpsi maksimum

z = Koefisien kemiringan garis (slope)

$$a = 1/Kb \quad (8)$$

Keterangan:

a = Intersep pada sumbu y

K = Kontanta energi adsorpsi

b = Kapasitas adsorpsi maksimum

$$K = 1/ab \quad (9)$$

Keterangan:

K = Kontanta energi adsorpsi

a = Intersep pada sumbu y

b = Kapasitas adsorpsi maksimum

Tabel 5. Perhitungan nilai b dan K untuk sejumlah n satuan percobaan (persamaan $y=a+zx$)

Satuan Percobaan	Isotermal Langmuir ($y=a+zx$)	z [$z=1/b$]	b [$b=1/z$] mg kg ⁻¹	a [$a=1/Kb$]	K [$K=1/ab$]
1					
2					
...					
...					
n					

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Penambahan biochar tongkol jagung 10 Mg ha^{-1} mampu menurunkan ketersediaan logam Cu dan Zn pada tanah dengan tingkat ketercemaran logam berat rendah (S_1), sedangkan biochar tongkol jagung pada tingkat logam berat kontrol (S_0) dan tinggi (S_2) tidak menurunkan ketersediaan Cu dan Zn.
2. Terjadi perubahan setelah penambahan biochar tongkol jagung 10 Mg ha^{-1} yang mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) disetiap tingkat logam berat, sedangkan pada tanah tingkat logam berat kontrol (S_0) penambahan biochar mampu menurunkan konstanta energi adsorpsi (K_{Cu}), tetapi tingkat logam berat rendah (S_1) dan tinggi (S_2) tidak berbeda nyata.
3. Nilai b dan K terhadap logam Zn dalam penelitian ini lebih rendah dibandingkan logam Cu dan koefisien determinasi (R^2) logam Zn tidak mendekati angka 1 pada grafik persamaan Isotermal Langmuir sehingga model Isotermal Langmuir tidak dapat digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi antara biochar tongkol jagung dan logam Zn.
4. Terdapat korelasi antara kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) yang berkorelasi nyata negatif dengan Cu Tersedia, Zn Tersedia dan pH tanah, berkorelasi negatif tidak nyata dengan C-organik tanah, berkorelasi nyata positif dengan kadar liat, dan berkorelasi positif tidak nyata dengan KTK tanah. Konstanta energi adsorpsi (K_{Cu}) berkorelasi nyata negatif dengan pH dan kadar liat tanah, berkorelasi tidak nyata negatif dengan ketersediaan Cu dan Zn, serta berkorelasi tidak nyata positif dengan KTK dan C-organik tanah

dengan *Simple Linear Regression*.

5. Kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) berkorelasi nyata negatif dengan ketersediaan Cu dan pH tanah serta berkorelasi nyata positif dengan ketersediaan Zn, KTK, kadar liat, dan C-organik tanah. Sementara itu, konstanta energi adsorpsi logam Cu (K_{Cu}) berkorelasi nyata positif dengan ketersediaan Cu dan Zn, serta berkorelasi negatif dengan pH, KTK, kadar liat, dan C-organik tanah dengan uji *Multiple Linear Regression*.

5.2 Saran

Bedasarkan penelitian yang telah dilakukan penulis memberikan saran untuk penelitian selanjutnya dalam pembuatan biochar tongkol jagung atau biochar dengan bahan lainnya dilakukan analisis awal untuk kandungan biochar.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dalam penetapan nilai b dan K untuk logam berat Zn dapat dilakukan dengan model Isoterm lainnya atau logam Cu dan Zn dipisah dengan konsentrasi masing-masing logam agar tidak terjadi kompetisi antar logam dalam adsorpsi logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdu, N., Abdullah, A.A., dan Abdulkadir, A. 2017. Heavy Metals and Soil Microbes. *Enveron Chemistry Letters*. 15(1): 65-84.
- Achmad, F., Setiawan, D., Hukama, I., dan Lisnuraini. 2023. Pembuatan Briket Tongkol Jaung sebagai Sumber Energi Alternatif oleh Kelompok Tani Desa Titiwangi Lampung Selatan. *Jurnal Ilmiah Pangabdhi*. 9(2): 90-95.
- Aini, H., Rahayu, P., Ulianas, A., Agustian, E., dan Sulaswatty, A. 2023. Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Karakteristik Biochar dari Limbah Padat Agroindustri Teh. *Jurnal Sains dan Teknologi*. 2(6): 1173-1183.
- Alatawi, R. 2024. Adsorption of Heavy Metals onto Thermochemically Treated Waste Materials. *Thesis*. University of Newcastle.
- Alloway, B.J. 2013. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in The Soil-Plant-System*. Springer. The United States of America, pp. 614.
- Ardina, Y. Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap Tanah terhadap Cu dan Zn pada Tanah Tercemar Logam Berat Diperlakukan dengan Biochar Sekam Padi. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Asnawati, A., Kharismaningrum, R.R., dan Andriani, N. 2017. Penentuan Kapasitas Adsorpsi Selulosa terhadap Rhodamin B dalam Sistem Dinamis. *Jurnal Kimia Riset*. 2(1): 23-29.
- Azka, M.H., Abubakar, Y., dan Karim, A. 2023. Hubungan antara Karakteristik Lahan dan Produksi Kopi Robusta di Kabupaten Pidie. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*. 8(4): 684-697.
- Badan Pusat Statistik. 2023. *Statistik Lingkungan Hidup Indonesia*. BPS Statistics Indonesia. Jakarta. 1014 hlm.
- Bradl, H.B. 2005. Adsorption of Heavy Metal Ions on Soils and Soils Constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*. 277(1): 1-18.
- Brady, N. dan Weil, R.R. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson. United States of America, pp. 1071.

- Butar, H.S.B. 2024. Perubahan Ketersediaan Cu, Zn, dan Ni pada Tanah 25 Tahun Pascaperlakuan Limbah Industri akibat Pemberian Biochar Batang Tanaman Karet. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Chlopecka, A., Bacon, J.R., Wilson, M.J., dan Kay, J. 1996. Heavy Metals in the Environment. *Journal of Environmental Quality*. 25(1): 69-79.
- Costa, O. Y. A., Raaijmakers, J. M., dan Kuramae, E. E. 2018. Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function And Impact On Soil Aggregation. *Frontiers In Microbiology*. 1 (9): 1-14.
- Damris, M. dan Ngajito. 2021. Modifikasi Permukaan Biochar dengan MnO_2 , Thiol dan Alkaline KOH untuk Removal Zn, Cr dan Cu Air Asam Tambang. *Skripsi*. Universitas Jambi. Jambi.
- Danarto, Y.C. 2007. Kinetika Adsorpsi Logam Berat Danarto, Y. C. 2007. Kinetika Adsorpsi Logam Berat Cr (VI) dengan Adsorben Pasir yang Dilapisi Besi Oksida. *Ekulilibrium*. 6(2): 65-70.
- Fatmawati dan Lubis, A.S. 2020. Pengaruh Perilaku Kewirausahaan terhadap Kemampuan Manajerial pada Pedagang Pakaian Pasar Pusat Kota Medan. *Jurnal Muhammadiyah Manajemen Bisnis*. 1(1): 1-9.
- Firdaus, M., Mawardi, dan Amrin. 2013. Optimasi Tanah Napa sebagai Adsorben Ion Cu(II). *Chemistry Journal of State University of Padang*. 2(2): 80-85.
- Foo, K.Y. dan Hameed, B.H. 2010. Insight Into the Modeling of Adsorption Isotherm, Kinetic and Thermodynamic. *Chemical Engineering Journal*. 156(1): 2-10.
- Gotore, O., Masere, T.P., dan Muronda, M.T. 2024. The Immobilization and Adsorption Mechanisms of Agro-Waste Based Biochar: A Review on The Effectiveness of Pyrolytic Temperatures on Heavy Metal Removal. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. 6: 92-103.
- Hair, J. R., Joseph, F., Black, W.C., Babin, B.J., dan Anderson, R.E. 2011. *Multivariate Data Analysis*. Prenticehall, Inc. New Jersey, pp.730.
- Hamzah, A. dan Priyadarshini, R. 2019. *Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat*. UNITRI Press. Malang. 21 hlm.
- Handayani, M. dan Sulistiyono, E. 2009. Uji Persamaan Langmuir Dan Freundlich Pada Penyerapan Limbah Chrom (VI) Oleh Zeolit. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Nuklir*. PTNBR-BATAN Bandung. Hlm 130-136.

- Harahap, F.S., Kurniawan, D., dan Susanti, R. Pemetaan Status pH Tanah dan C-Organik Tanah Sawah Tadah Hujan di Kecamatan Panai Tengah Kabupaten Labuhanbatu. *Jurnal Penelitian Agronomi*. 23(1): 37-42.
- Hardjowigeno, S. 2007. *Ilmu Tanah*. CV Akademika Pressindo. Jakarta. 248 hlm.
- Harefa, D. F. C. dan Zebua, M. 2024. Peran Kapasitas Tukar Kation Dalam Mempertahankan Kesuburan Tanah Pada Berbagai Jenis Tekstur Tanah. *Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan*. 1(1): 165-170.
- Hasyyati, N.A., Nurmi, dan Ilahude, Z. 2023. Analisis Kandungan Unsur Hara Mikro (Mn, Fe, Zn), C-Organik dan Kadar Air pada Lahan Jagung (*Zea mays* L.) di Kecamatan Tabongo Kabupaten Gorontalo. *Jurnal Lahan Pertanian Tropis*. 2(2): 104-109.
- Hidayat, B. 2015. Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat dengan Menggunakan Biochar. *Jurnal Pertanian Tropik*. 2(1): 51-61.
- Heryani, U., Hidayat, B., dan Mukhlis. 2018. Pemanfaatan Beberapa Jenis Biochar untuk Mempertahankan N-Total Tanah Inceptisol. *Jurnal Pertanian Tropik*. 5(3): 374-381.
- Hou, R., Zhu, B., Wang, L., Gao, S., Wang, R., dan Hou, D. 2024. Mechanism of Clay Mineral Modified Biochar Simultaneously Immobilizes Heavy Metals and Reduces Soil Carbon Emissions. *Journal Of Environmental Management*. 361(1): 1-13.
- Houben, D., Evrard, L., dan Sonnet, P. 2013. Benefical Effect of Biochar Application to Contaminated Soils on The Bioavailability of Cd, Pb and Zn and The Biomass Production of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass and Bioenergy*. 57: 196-240.
- Ibbet, R.N., Kaenthong, S., Philips, D.A.S., dan Wilding, M.A. 2006. Charaterisatim of Porosity of Regenerated Cellulosil Fibres Using Classical Dye Adsorbtion Techniques. *Lenzinger Berichte*. 85: 77-86.
- Indirawati, S.M. 2017. Pencemaran Logam Berat Pb dan Cd dan Keluhan Kesehatan pada Masyarakat di Kawasan Pesisir Belawan. *Jurnal Jumantik*. 2(2): 54-60.
- Ippolito, J.A., Laird, D.A., dan Busscher W.J. 2012. Enviromental Benefit of Biochar. *Journal of Environmental Quality*. 41(4): 967-972.
- Jury, W.A., Gardner, W.R., dan Gardner, W.H. 1991. *Soil Physics*. Fifth Edition. New York, pp. 1-325.

- Kasno, A. 2019. Perbaikan Tanah untuk Meningkatkan Efektivitas dan Efisiensi Pemupukan Berimbang dan Produktivitas Lahan Kering Masam. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 13(1): 27-40.
- Khasanah, U., Mindari, W., dan Suryaminarsih, P. 2021. Kajian Pencemaran Logam Berat pada Lahan Sawah di Kawasan Industri Kabupaten Sidoarjo. *Jurnal Teknik Kimia*. 15(2): 73-81.
- Krull, E.S., Skjemstad, J.O., dan Baldock, J.A. 2009. *Functions of Soil Organic Matter and the Effect on Soil Properties*. GRDC Final Report. Canberra, pp. 1-128.
- Kurnia, R.D. 2023. Perubahan Ketersediaan dan Serapan Cu-Zn oleh Rumput Gajah (*Pennisetum purpureum*) pada Tanah Tercemar Logam Berat dengan Perlakuan Berbagai Jenis Biochar. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Kurniawan, P., Kamiyatun, M., dan Soebiyono. 2020. Reduksi Kandungan Logam Berat Fe pada Air Sungai Jenis Salatiga secara Adsorpsi Menggunakan Karbon Aktif. *Journal of Chemical Engineering*. 1(1): 12-17.
- Kusuma, Y.R. dan Yanti, I. 2021. Pengaruh Kadar Air dalam Tanah terhadap Kadar C-Organik dan Keasaman (pH) Tanah. *Indonesian Journal of Chemical Research*. 6(2): 92-97.
- Lehman, J. dan Joseph, S. 2015. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge. New York, p. 976.
- Lestari, I., Mahraja, M., Farid, F., Gusti, D.R., dan Permana, E. 2020. Penyerapan Ion Pb(II) Menggunakan Adsorben dari Limbah Padat Lumpur Aktif Pengelolaan Air Minum. *Chemistry Progress*. 13(2): 68-76.
- Li, H.B., Xiao, L., Evandro, B., dan Wang, Z. 2017. Mechanisms of Metal Sorption by Biochar: Biochar Characteristics and Modifications. *Chemosphere*. 178: 466-478.
- Martell, A. E. dan Hancock, R. D. 1996. *Metal Complexes in Aqueous Solution*. Plenum Press. New York, pp. 253.
- Martina, D., Hastuti, R., dan Widodo, D.S. 2016. Peran Adsorben Selulosa Tongkol Jagung (*Zea mays*) dengan Polivinil Alkohol (PVA) untuk Penyerapan Ion Logam Timbal (Pb^{2+}). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 19(3): 77-82.
- Mautuka, Z.A., Maifa, A., dan Karbeka, M. 2022. Pemanfaatan Biochar Tongkol Jagung Guna Perbaikan Sifat Kimia Tanah Lahan Kering. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*. 8(1): 201-208.

- Mayangsari, N.E., dan Astuti, U.P. 2021. Model Kinetika Adsorpsi Logam Berat Cu^{2+} Menggunakan Selulosa Daun Nanas. *Jurnal Chemurgy*. 5(1): 15-21.
- Miri, N.S.S. dan Narimo. 2022. Review: Kajian Persamaan Isoterm Langmuir dan Freundlich pada Adsorpsi Logam Berat Fe (II) dengan Zeolit dan Karbon Aktif dari Biomassa. *Jurnal Kimia dan Rekayasa*. 2(2): 58-71.
- Mustaqiman, A. N., Wirosodarmo, R., Suharto, B., Ilham, A., dan Suwito, H. 2021. Pengaruh Biochar Sekam Padi dan Tongkol Jagung terhadap Penurunan Logam Fe. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*. 13 (2): 1-9.
- Ningsih, D.A., Said, I., dan Ningsih, P. 2016. Adsorpsi Logam Timbal (Pb) dari Larutannya dengan Menggunakan Adsorben dari Tongkol Jagung. *Jurnal Akademika Kimia*. 5(2): 55-60.
- Nix, R. 2024. *Chemistry Libretexts*. Queen Mary University of London. London.
- Nurida, N.L. 2014. Potensi Pemanfaatan Biochar untuk Rehabilitasi Lahan Kering di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan Edisi Khusus*. 8(3): 57-68.
- Nursyamsi, D., Idris, K., Sabiham, S., Rachim, D.A., dan Sofyan, A. 2007. Sifat-Sifat Tanah Dominan yang Berpengaruh terhadap K Tersedia pada Tanah-Tanah yang Dominan Smektit. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 26: 13-28.
- Ogundele, D. T., Adio, A.A., dan Oludele, 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.
- Oktariani, P., Suwardi, Widjaja, H., Suryaningtyas, D.T., dan Putri, A. 2024. Teknologi Remediasi Tanah Terkontaminasi Logam Berat pada Reklamasi Lahan Bekas Tambang Tembaga. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Pertambangan*. 1(1): 45-54.
- Pakpahan, A.F. 2019. Sebaran Spasial Cu dan Zn dalam Tanah Ultisol Sidosari Lampung Selatan 21 Tahun Setelah Perlakuan Limbah Industri. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Perdana, A., Zarkasi, A., Hamdani, D., Natalisanto, A.I., dan Munir, R. 2023. Karakteristik Ampas The dalam Menyerap Ion Logam Timbal menggunakan Model Isotermal Langmuir. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*. 7(1): 90-97.
- Prabowo, A. L. 2009. Pembuatan Karbon Aktif dari Tongkol Jagung serta Aplikasinya untuk Adsorpsi Cu, Pb, dan Amonia. *Skripsi*. Universitas Indonesia. Depok.

- Pradani, N. 2024. Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap Tanah terhadap Cu dan Zn pada Tanah Tercemar Logam Berat akibat Perlakuan Biochar Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Putri, O.H., Utami, S.R., dan Kurniawan, S. 2019. Sifat Kimia Tanah Pada Berbagai Penggunaan Lahan di UB Forest. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 6(1): 1075-1081.
- Putri, V. I., Mukhlis., dan Hidayat, B. 2017. Pemberian Beberapa Jenis Biochar Untuk Memperbaiki Sifat Kimia Tanah Ultisol dan Pertumbuhan Tanaman Jagung. *Jurnal Agroekoteknologi FP USU*. 5(4): 824-828.
- Rahmatina, I.S., dan Titah, H.S. 2022. Kajian Literatur *Enhanced Phytoremediation* Lahan Tercemar Logam Berat Merkuri. *Jurnal Teknik ITS*. 11(2): 69-74.
- Rawat, J., Saxena, J., dan Sanwal, P. 2019. *Biochar : A Sustainable Approach for Improving Plant Growth and Soil Properties*. Interchopen. India, pp. 1-17.
- Rizkyi, I.P., Susatyo, E.B., dan Susilaningsih, E. 2016. Aktivasi Arang Tongkol Jagung Menggunakan HCl sebagai Adsorben Ion Cd (II). *Indonesian Journal of Chemical Science*. 5(2): 124-129.
- Rokhati, N., Prasetyaningrum, A., Hamada, N.A., Utomo, A.L.C., Kurniawan, H.B., dan Nugroho, I.H. 2021. Pemanfaatan Tongkol Jagung sebagai Adsorben Limbah Logam Berat. *Inovasi Teknik Kimia*. 6(2): 89-94.
- Rodriguez, A., Lemos, D., Trujillo, Y. T., Amaya, J. G., dan Ramos, L. D. 2019. Effectiveness of Biochar Obtained from Corncob for Immobilization of Lead in Contaminated Soil. *Journal Of Health And Pollution*. 9(23): 1-10.
- Sahfitra, A.A. 2023. Variasi Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan Kejenuhan Basa (Kb) pada Tanah Hemic Haplosaprist yang Dipengaruhi oleh Pasang Surut di Pelalawan Riau. *Jurnal Ilmiah Pertanian*. 19(1): 103-112.
- 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., Arisanti, V., dan Yusnaini, S. 1999. Penurunan Aktivitas Fosfatase Asam di Daerah Perakaran Beberapa Jenis Tanaman Akibat Perlakuan Kapur dan Limbah Industri Bertimah Hitam. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 2(1): 1-6.
- 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. *Journal of Tropical Soils*. 11: 31-46.

- Salam, A.K. 2017. *Management of Heavy Metals in Tropical Soil Environment*. Global Madani Press. Bandar Lampung. 257 hlm.
- Salam, A. K. 2020. *Ilmu Tanah*. Global Madani Press. Bandar Lampung. 393 hlm.
- Salam, A. K., Pakpahan, A. F., Susilowati, G., Fernando, N., Sriyani, N., Sarno, S., Hery N., Sri, Y., dan Dermiyati, D. 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: 1-14.
- Salam, A.K., Rizki, D.O., Santa, I.T.D., Supriatin, S., Septiana, L.M., dan Niswati, A. 2022. The Biochar-Improve 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(1): 1-10.
- Salam, A.K. 2023. *Pengantar Ilmu Kimia Tanah*. Global Madani Press. Bandar Lampung. 192 hlm.
- Sandi, A.A.M. 2023. Pertumbuhan dan Serapan Cu dan Zn Bayam Duri pada Tanah Tercemar Logam Berat Diperlakukan Biochar dengan Berbagai Kehalusan. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Schulin, R., Geiger, G., dan Furrer, G. 1995. *Heavy Metal Retention by Soil Organic Matter under Changing Environmental Conditions*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. New York, pp. 53-85.
- Sehangunaung, G.A., Mandey, S.L., dan Roring, F. 2023. Analisis Pengaruh Harga, Promosi dan Kualitas Pelayanan terhadap Kepuasan Konsumen Pengguna Aplikasi Lazada di Kota Manado. *Jurnal EMBA*. 11(3): 1-11.
- Shofiyani, A. dan Gusrizal. 2006. Pengaruh pH dan Penentuan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat pada Biomassa Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*). *Indo. J. Chem*. 6(1): 56-60.
- Shi, K., Wang, X., Chu, X., Li, T., Yin, Y., dan Shen, C. 2023. Impact of Heavy Metal Cations on Deposition and Release of Clay Colloids in Saturated Porous Media. *Vadose Zone Journal*. 22(1): 1-14.
- Sparks, D.L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press. United States of America, pp. 1-352.
- Subarkhah, M.J. dan Titah, H.S. 2023. Remediasi Logam Berat Pb dengan Menggunakan Biochar Sekam Padi dan Tongkol Jagung. *Jurnal Sains dan Seni*. 12(1): 2337-3520.

- Suryani, I. 2014. Kapasitas Tukar Kation (KTK) Berbagai Kedalaman Tanah pada Areal Konversi Lahan Hutan. *Jurnal Agrisistem*. 10(2): 99-106.
- Sylvia, N., Damanik, S., Muhammad, dan Nasrul, Z.A. 2022. Kajian Kolom Adsorpsi Zat Warna Methyl Orange Menggunakan Adsorben dari Ampas Teh. *Jurnal Teknologi Unimal*. 11(2): 122-135.
- Tan, K. H. 2011. *Principles of Soil Chemistry Fourth Edition*. Crc Press. London, pp. 1-390.
- Tarigan, E. M., Lubis, K. S., dan Hannum, H. 2019. Kajian Tekstur, C-Organik, dan pH Tanah Ultisol pada Beberapa Vegetasi di Desa Gunung Datas Kecamatan Raya Kahean. *Jurnal Agroteknologi FP USU*. 7(1): 230-238.
- Viviani, A., Ermadani, E., dan Yanova, S. 2021. Efektivitas Karbon Aktif Tongkol Jagung dalam Mengadsorpsi Logam Fe (Besi) pada Air Sumur Gali di Perumahan Mutiara Kenali Kota Jambi. *Thesis*. Universitas Jambi. Jambi.
- Wafti, N.S.A., Lau, H.L.N., Loh, S.K., Aziz, A.A., Rahman, Z.A., dan May, C.Y. 2017. Activated Carbon From Oil Palm Biomassa as Potential Adsorben for Palm Oil Mill Effluent Treatment. *Journal of Oil Palm Research*. 29(2): 278-290.
- Wang, L., Yang, M., Fan, X., Zhu, X., Xu, T., dan Yuan, Q. 2011. An Environmentally Friendly and Efficient Method for Xylitol Bioconversion with High-Temperature-Steaming Corn cob Hydrolysate by Adapted *Candida Tropicalis*. *Process Biochemistry*. 46(8): 1619-1626.
- 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. P. 042113.
- Widyatmoko, H. 2011. Akurasi pH sebagai Parameter Tingkat Pencemaran Logam Berat dalam Tanah. *Jurnal Tanah Lingkungan*. 5(5): 173-178.
- Wijayanti, A., Susatyo, E. B., Kurniawan, C., dan Sukarjo. 2018. Adsorpsi Logam Cr (VI) Dan Cu (II) pada Tanah dan Pengaruh Penambahan Pupuk Organik. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 7(3): 243-248.
- 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 Chemsitry*. 13(1): 3505-3519.

- Yustinah, Hudzaifah, Aprilia, M., dan Syamsudin, A.B. 2019. Kesetimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) dengan Adsorben Tanah Diatomit secara Batch. *Jurnal Konversi*. 9(1): 17-28.
- Yosephine, I. O., Sakiah., dan Siahaan, E. A. L. 2020. Pemberian Beberapa Jenis Biochar terhadap C-Organik dan N-Total pada Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit. *Jurnal Penelitian Agronomi*. 22(2): 79-82.
- Zahroh, F. 2010. Kajian Kesetimbangan Adsorpsi Cr (VI) pada Biomassa Kangkung Air (*Ipomoea aquatica Forsk*). *Thesis*. Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim. Malang.
- Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E., dan Stawarczyk, K. 2019. Sources of Soil Pollution by Heavy Metals and Their Accumulation in Vegetables: a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*. 230(7): 1-9.