

**PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TANAH
TERHADAP Cu DAN Zn PADA TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT
DIPERLAKUKAN DENGAN *BIOCHAR* SEKAM PADI**

(Skripsi)

Oleh

**Yesi Ardina
2114181028**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TANAH
TERHADAP Cu DAN Zn PADA TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT
DIPERLAKUKAN DENGAN *BIOCHAR* SEKAM PADI**

Oleh

YESI ARDINA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP TANAH TERHADAP Cu DAN Zn PADA TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT DIPERLAKUKAN DENGAN *BIOCHAR* SEKAM PADI

Oleh

YESI ARDINA

Tanah di desa Sidosari, Kecamatan Natar, Kabupaten Lampung Selatan, telah mengalami pencemaran terstruktur oleh logam berat Cu dan Zn sejak 26 tahun lalu akibat perlakuan limbah industri sendok logam dari PT *Star Metal Ware Industry*, Jakarta. Logam berat merupakan polutan berbahaya dalam tanah yang apabila terserap oleh akar tanaman akan memasuki rantai makanan yang membahayakan makhluk hidup. Penambahan *biochar* sekam padi sebagai bahan pembenah tanah diharapkan dapat mengurangi ketersediaan logam berat dalam tanah. Sekam padi menjadi salah satu limbah pertanian yang melimpah dengan tingginya rasio C/N sehingga lebih cocok dijadikan sebagai arang (*biochar*) daripada kompos. Sekam padi mengandung senyawa lignin yang dapat meningkatkan luas permukaan *biochar* untuk menyerap kation logam berat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan memanfaatkan *biochar* sekam padi untuk meningkatkan kemampuan kompleks jerapan tanah terkait jumlah maksimum logam berat yang dapat ditahan (b) dan konstanta energi ikatan (K) antara logam berat dengan koloid tanah.

Penelitian ini disusun secara faktorial dengan 2 faktor dan 3 ulangan dalam Rancangan Acak Lengkap (RAL). Faktor pertama adalah tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri (S) yang terdiri dari tanah tidak tercemar logam berat 0 Mg ha^{-1} (S_0) atau kontrol, tercemar limbah takaran 15 Mg ha^{-1} (S_1) atau konsentrasi rendah, dan takaran 60 Mg ha^{-1} (S_2) atau konsentrasi tinggi. Faktor kedua, *biochar* sekam padi (B) dengan dosis 0 (B_0); 5 (B_1); dan 10 Mg ha^{-1} (B_2). Perubahan nilai b dan K tanah akibat pengaplikasian *biochar* sekam padi dihitung dengan menggunakan persamaan Isotermal Langmuir dan pengukuran konsentrasi logam dengan *flame* AAS. Sementara itu, peubah pendukung lainnya seperti

ketersediaan logam berat Cu dan Zn, pH tanah, KTK tanah, kandungan C-organik tanah, dan kadar liat dalam tanah secara berturut-turut ditentukan menggunakan metode pengestrak 1 N HNO₃ (asam nitrat), metode H₂O (1:2), metode NH₄OAc 1 N pH 7, metode Walkey and Black, dan metode hidrometer.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah 26 tahun pascaperlakuan limbah industri memiliki ketersediaan logam Cu secara berturut-turut dari yang tertinggi adalah $S_0 > S_2 > S_1$. Tanah S_2 menunjukkan pengaruh konsentrasi Cu yang signifikan secara berturut turut pada pengaplikasian dosis *biochar* sekam padi $B_1 > B_2 > B_0$ dalam meningkatkan konsentrasi Cu. Penambahan *biochar* sekam padi dengan dosis 5 Mg ha⁻¹ (B_1) berpengaruh nyata dalam meningkatkan nilai b pada tanah S_0 dan S_1 dan tidak berpengaruh pada tanah S_2 . Sementara itu, *biochar* sekam padi dosis 5 Mg ha⁻¹ menurunkan nilai K tanah terhadap logam berat Cu pada tanah S_0 . Adsorpsi logam berat Zn tidak dapat digambarkan dengan baik menggunakan persamaan Isotermal Langmuir. Kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) memiliki korelasi yang nyata dan positif dengan kadar liat tanah. Konstanta energi adsorpsi logam Cu (K_{Cu}) berkorelasi positif dengan ketersediaan Cu, pH, C-organik, dan KTK, sedangkan dengan kadar liat tanah berkorelasi negatif.

Kata kunci: *Biochar*, Isotermal Langmuir, Kapasitas Adsorpsi Maksimum (b), Konstanta Energi Adsorpsi (K), Sekam Padi, Seng, Tembaga.

ABSTRACT

CHANGES IN SOIL ADSORPTION CAPACITY AND ENERGY CONSTANT FOR COPPER (Cu) AND ZINC (Zn) IN SOIL HISTORICALLY POLLUTED WITH HEAVY METALS TREATED WITH RICE HUSK BIOCHAR

By

YESI ARDINA

The land in Sidosari, Natar District, South Lampung Regency, had been with heavy metals Cu and Zn since 26 years ago due to intentional polluted with waste of metal spoon industry from PT Star Metal Ware Industry, Jakarta. Heavy metals are hazardous pollutants in the soils which, when absorbed by plant roots, may enter a food chain that is harmful to living things. The addition of rice husk biochar as a soil conditioner is expected to reduce the availability of heavy metals in soils. Rice husk is one of the abundant agricultural wastes with a high C/N ratio, making them more suitable as charcoal (biochar) than compost. Rice husk contains lignin compounds that can increase the surface area of biochar to adsorb heavy metal cations. Therefore, this research was to utilize rice husk biochar to study the ability of the soil adsorption complex related to the maximum amount of heavy metals that can be retained (b) and the strength of the bond energy constant (K) between heavy metals and soil colloids.

This study was arranged factorially with 2 factors and 3 replications in a Completely Randomized Design (CRD). The first factor was soil with a history of industrial waste treatment (S) consisting of soil untreated with heavy metals 0 Mg ha^{-1} (S_0) or control, treated with waste at a dose of 15 Mg ha^{-1} (S_1) or low heavy metals, and a dose of 60 Mg ha^{-1} (S_2) or high heavy metals. The second factor, rice husk biochar (B) with a dose of 0 (B_0); 5 (B_1); and 10 Mg ha^{-1} (B_2). Changes in soil b and K values due to the application of rice husk biochar were calculated using the langmuir isothermal and measurement of metal

concentration with flame AAS. Meanwhile, other supporting variables such as the availability of heavy metals Cu and Zn, soil pH, soil CEC, soil organic C content, and clay content were determined using the N HNO_3 (nitric acid) method, the H_2O (1:2), the NH_4OAc 1 N pH 7 method, the Walkley and Black method, and the hydrometer method.

The results of the study indicated that the soil 26 years after industrial waste treatment should have a Cu metal availability from the highest $S_2 > S_1 > S_0$. Soil S_2 showed a significant effect of Cu concentration consecutively on the application of rice husk biochar doses $B_2 > B_1 > B_0$. The addition of rice husk biochar with a dose of 5 Mg ha^{-1} (B_1) had a significant effect on increasing the b value on soil S_0 and S_1 and had no effect on soil S_2 . Meanwhile, rice husk biochar at a dose of 5 Mg ha^{-1} reduced the soil K in S_0 . The adsorption of Zn could not be described well using the Langmuir isotherm. The maximum adsorption capacity of Cu metal (b_{Cu}) had a significant and positive correlation with soil clay content. The Cu adsorption energy constant (K_{Cu}) was positively correlated with the availability of Cu, pH, C-organic, and CEC, while it was negatively correlated with clay content.

Keywords: Adsorption Energy Constant (K), Biochar, Copper, Langmuir Isotherm, Maximum Adsorption Capacity (b), Rice Husk, Zinc.

Judul Skripsi : **PERUBAHAN KAPASITAS DAN ENERGI JERAP
TANAH TERHADAP Cu DAN Zn PADA TANAH
TERCEMAR LOGAM BERAT DIPERLAKUKAN
DENGAN *BIOCHAR* SEKAM PADI**

Nama Mahasiswa : **Yesi Ardina**

NPM : **2114181028**

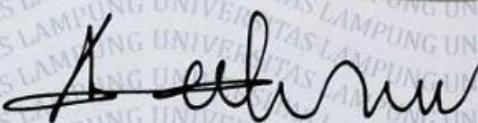
Program Studi : **Ilmu Tanah**

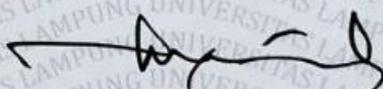
Fakultas : **Pertanian**



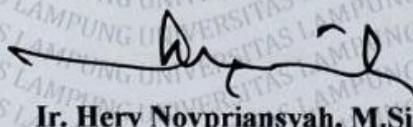
Pembimbing pertama

Pembimbing Kedua


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


Ir. Hery Novpriansyah, M.Si.
NIP 196611151990101001

2. Ketua Jurusan Ilmu Tanah

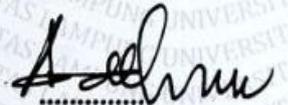

Ir. Hery Novpriansyah, M.Si
NIP 196611151990101001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

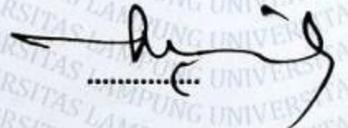
Ketua

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



Sekretaris

Ir. Hery Novpriansyah, M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing

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



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Kuswanta Futas Hidayat, M. P.

NP 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 20 Desember 2024

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap Tanah terhadap Cu dan Zn pada Tanah Tercemar Logam Berat Diperlakukan dengan *Biochar* Sekam Padi”** merupakan hasil karya saya sendiri dan bukan karya 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 yang berlaku. Jika di kemudian hari terbukti skripsi ini merupakan hasil salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 20 Desember 2024
Penulis,



Yesi Ardina
NPM 2114181028

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Gisting, Kabupaten Tanggamus pada tanggal 22 Juni 2003. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Jamak Uddin dan Ibu Heryanti. Penulis menempuh pendidikan formal di Sekolah Dasar Negeri 1 Negeri Ratu pada tahun 2009-2015, kemudian melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Kota Agung pada tahun 2015-2018, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Kota Agung pada tahun 2018-2021.

Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung melalui jalur seleksi SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis memiliki pengalaman menjadi asisten dosen pada semester yang berbeda-beda di beberapa praktikum mata kuliah, seperti Ilmu Tanah Hutan, Dasar-Dasar Ilmu Tanah, Kimia Dasar Anorganik, Kimia Dasar Organik, Kimia Tanah, dan Interaksi Hara Tanah Tanaman. Selain itu, penulis juga aktif dalam organisasi internal kampus pada tingkat jurusan yaitu anggota organisasi Gamatala (Gabungan Mahasiswa Ilmu Tanah Unila) (2023-2024) dan menjadi Sekretaris Bidang Pengabdian Masyarakat (2024). Pada tingkat fakultas, penulis pernah bergabung di Forum Ilmiah Mahasiswa Fakultas Pertanian sebagai tutor atau asisten (2022-2023). Pada tingkat universitas, penulis juga pernah bergabung di UKM U Sains dan Teknologi Universitas Lampung (2022-2023) sebagai anggota Departemen Riset dan Teknologi.

Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata di Desa Kemu, Kecamatan Banjit, Kabupaten Waykanan. Penulis melaksanakan kegiatan Praktik Umum (PU) di UPTD Laboratorium Lingkungan, Dinas Lingkungan Hidup, Provinsi Lampung.

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim, dengan menyebut nama Allah SWT.

Alhamdulillahirabbilalamin, Segala puji hanya kepada Allah SWT, Rabb semesta alam atas nikmat dan karunia serta hidayah-Nya yang selalu terlimpah dalam kelancaran hamba-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Dengan penuh rasa syukur,ku persembahkan skripsi ini untuk:

Keluarga tercinta, yaitu Ibunda Heryanti, Ayahanda Jamak Uddin, dan adik-adikku Diki Ardian dan Mika Arsanda yang selalu memberikan cinta kasih, motivasi, dukungan, semangat secara lahir dan batin, dan doa yang terucap tiada henti-hentinya untuk kesuksesan penulis selama ini. Kupersembahkan karya kecil ini sebagai salah satu wujud kesungguhanku. Terimakasih sekali lagi teruntuk Ibundaku tercinta, doamu menembus langit. Semoga Allah senantiasa melindungi dan melimpahi kebahagiaan untuk kita semua....Aamiin.

Serta

Almamater Tercinta

Ilmu Tanah

Fakultas Pertanian

Universitas Lampung.

MOTTO

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi (pula) kamu menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui”

(QS Al-Baqarah ayat: 216)

“Tidak ada balasan untuk kebaikan selain kebaikan (pula)”

(QS Ar-Rahman: 60)

“Appear weak when you are strong, and strong when you are weak”

(Sun Tzu)

“Loving yourself isn't vanity, it's sanity”

(Katrina Mayer)

“There are three constants in life...change, choice, and principles”

(Stephen Covey)

“Bila ada bunga yang mati, maka akan ada banyak buah yang tumbuh. Demikian pula dengan hidup manusia, bukan? Sebab ada angan-angan muda yang mati, kadang-kadang timbullah angan-angan yang lainnya, dan yang lebih sempurna”

(R.A. Kartini)

SANWACANA

Bismillahirrahmanirrahim, Alhamdulillahirrabbilalamin, segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, nikmat, serta hidayah-Nya, shalawat serta salam juga penulis sanjungkan kepada Rasulullah Muhammada SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Perubahan Kapasitas dan Energi Jerap Tanah terhadap Cu dan Zn pada Tanah Tercemar Logam Berat Diperlakukan dengan Biochar Sekam Padi”**

Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Pertanian pada Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Penulis sangat menyadari bahwa skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan dan arahan dari dosen pembimbing, keluarga, kerabat, dan pihak lain baik secara langsung maupun tidak langsung. Dengan demikian, perkenankanlah penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya 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 sekaligus sebagai dosen pembimbing kedua dan dosen Pembimbing Akademik atas segala masukan yang membangun, bimbingan, serta motivasinya selama penyusunan skripsi kepada penulis.
3. Bapak Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing utama atas kesabaran dan ketulusannya dalam memberikan bimbingan, saran, motivasi, dan dana analisis selama penelitian serta penyusunan skripsi.

4. Ibu Dr. Supriatin, S. P., M.Sc., selaku dosen pembahas yang telah memberikan arahan, saran, dan kritik yang membangun dalam penelitian dan penulisan skripsi.
5. Bapak dan Ibu Dosen Universitas Lampung, khususnya Jurusan Ilmu Tanah, yang telah memberi banyak ilmu yang bermanfaat kepada penulis.
6. Kedua orangtua tercinta, Ibunda Heryanti dan Ayahanda Jamak Uddin, yang telah memberikan kasih sayang, dukungan, motivasi, nasihat, dan doa yang tiada henti-hentinya secara lahir dan batin untuk kesuksesan penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dan menyanggah gelar Sarjana Pertanian.
7. Adik-adik tercinta Diki Ardian dan Mika Arsanda, yang telah mendukung dan memberikan semangat serta perhatian kepada penulis.
8. Kakakku tersayang, Rosita atas segala bentuk dukungannya kepada penulis dan bersedia menjadi tempat berbagi keluh kesah selama ini.
9. Sahabat-sahabatku, Afika Auliayi, Yasidik Nyamando, Jeni Anggraini, dan Tomi Riyanda yang selalu kebersamaian setiap langkah penulis dan berjuang bersama sejak masa Sekolah Menengah Pertama hingga saat ini.
10. Tim penelitian, Inggit Putri Mediva dan Nesa Pradani atas kerjasamanya dalam pelaksanaan penelitian.
11. Teman-teman Ilmu Tanah 2021 seperjuangan yang saling membantu dan bahu-membahu selama proses perkuliahan.
12. Kakak-kakak tingkat 2019 dan 2020 serta adik-adik tingkat 2022-2023 yang telah turut membantu dan memberi warna baru selama penulis berkuliah di Jurusan Ilmu Tanah.
13. Keluarga Besar Gabungan Mahasiswa Ilmu Tanah Unila (Gamatala) yang telah memberikan ruang bagi penulis untuk mengembangkan diri.
14. Teman-teman Kuliah Kerja Nyata (KKN) Desa Kemu Tahun 2024, Maura Balqis, Natalia Michelle, Alfina Dias, Panca Rulian, M. Surya, dan Ilman Farkhan, yang telah bersama-sama memberikan pengalaman baru di lingkungan baru bersama penulis dalam proses perkuliahan.
15. Teman-teman Asrama Putri Reflesia 1 yang telah kebersamaian kehidupan kos penulis selama masa perkuliahan.

16. Staf-staf Laboratorium Ilmu Tanah dan Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung yang membantu penulis selama masa perkuliahan dan penelitian.
17. Yesi Ardina, atas segala bentuk perjuangannya pantas diapresiasi sebesar-besarnya. Terima kasih telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan segala hal yang telah dimulai. Terima kasih sudah bertahan dan memilih tidak menyerah. Terima kasih atas segala afirmasi positif untuk diri sendiri di setiap waktunya. Terima kasih atas bentuk adaptasi yang sangat hebat dan luar biasa.
18. Semua pihak yang telah terlibat dan berjasa dalam penyusunan skripsi ini.

Ucapan terima kasih saja rasanya kurang cukup mewakili, segala doa baik penulis panjatkan semoga Allah SWT senantiasa membalas semua kebaikan yang telah Bapak, Ibu, dan rekan-rekan semua berikan kepada penulis dan semoga dapat kembali bertemu di kemudian hari dengan waktu dan kondisi yang lebih baik. Aamiin Allahumma Aamiin.

Bandar Lampung, 20 Desember 2024
Penulis,

Yesi Ardina

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL iii

DAFTAR GAMBAR..... vii

I. PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah..... 4

1.3 Tujuan 4

1.4 Kerangka Pemikiran..... 4

1.5 Hipotesis 8

II. TINJAUAN PUSTAKA..... 9

2.1 Pencemaran Tanah dan Air oleh Logam Berat 9

2.2 Kapasitas (b) dan Energi (K) Jerap untuk Penurunan Logam Berat dalam Tanah 10

2.3 Pengaruh *Biochar* terhadap Kapasitas (b) dan Energi (K) Jerap Logam Berat..... 12

2.4 Peran *Biochar* Sekam Padi dalam Menurunkan Kelarutan Logam Berat..... 13

2.5 Persamaan Isotermal Langmuir untuk Adsorpsi Logam Berat..... 14

III. METODOLOGI PENELITIAN..... 17

3.1 Waktu dan Tempat..... 17

3.2 Alat dan Bahan..... 17

3.3 Sejarah Lahan Pengambilan Contoh Tanah..... 18

3.4 Metodologi..... 19

3.5 Pelaksanaan Penelitian.....	19
3.5.1 Penyiapan Contoh Tanah.....	19
3.5.2 Pembuatan <i>Biochar</i>	20
3.5.3 Pengaplikasian <i>Biochar</i>	21
3.5.4 Pengairan	21
3.5.5 Percobaan Laboratorium	22
3.5.6 Analisis Data	28
3.6 Peubah Pengamatan	28
3.6.1 Peubah Utama.....	28
3.6.2 Peubah Pendukung	28
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Perubahan Kapasitas (b) dan Konstanta Energi Jerap (K) Tanah terhadap Cu pada Tanah dengan Riwayat Tercemar Limbah Industri Berlogam Berat akibat Pemberian <i>Biochar</i> Sekam Padi.....	29
4.2 Perubahan Beberapa Sifat Kimia dan Fisika Tanah akibat Penambahan <i>Biochar</i> Sekam Padi pada Tanah Tercemar Limbah Industri Berlogam Berat.....	43
4.3 Korelasi antara Kapasitas (b) dan Konstanta Energi Jerap (K) Tanah dengan Beberapa Sifat Kimia dan Fisika Tanah	50
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Pencampuran contoh tanah dengan larutan logam.	22
2. Penentuan nilai persamaan Isoterm Langmuir $y = a + zx$	24
3. Perhitungan nilai b dan K untuk sejumlah n satuan percobaan.	25
4. Pengaruh <i>biochar</i> sekam padi terhadap nilai kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K) pada tanah tercemar logam berat Cu.	30
5. Pengaruh <i>biochar</i> sekam padi terhadap beberapa sifat kimia dan fisika tanah.	44
6. Korelasi antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) tanah dengan logam Cu dan Zn dengan beberapa sifat kimia dan fisika tanah.	51
7. Korelasi antara konstanta energi adsorpsi (K) tanah terhadap logam Cu dan Zn dengan beberapa sifat kimia dan fisika tanah.	52
8. Data pengukuran logam Cu dengan lima konsentrasi larutan seri menggunakan AAS.	67
9. Hasil pengukuran larutan standar logam Cu.	72
10. Hasil pengukuran larutan standar logam Zn.	72
11. Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_0U_1$	73
12. Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_0U_2$	74
13. Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_0U_3$	74
14. Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_1U_1$	75

15.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_1U_2$	76
16.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_1U_3$	76
17.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_2U_1$	77
18.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_2U_2$	78
19.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_2U_3$	78
20.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_0U_1$	79
21.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_0U_2$	80
22.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_0U_3$	80
23.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_1U_1$	81
24.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_1U_2$	82
25.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_1U_3$	82
26.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_2U_1$	83
27.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_2U_2$	84
28.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_2U_3$	84
29.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_0U_1$	85
30.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_0U_2$	86
31.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_0U_3$	86
32.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_1U_1$	87
33.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_1U_2$	88
34.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_1U_3$	88
35.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_2U_1$	89
36.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_2U_2$	90
37.	Analisis Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_2U_3$	90

38.	Analisis <i>Standard Error of the Mean</i> (SEM) untuk perubahan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu akibat pemberian <i>biochar</i> sekam padi	92
39.	Analisis <i>Standard of the Mean</i> (SEM) untuk pengaruh pemberian <i>biochar</i> sekam padi terhadap beberapa sifat kimia dan fisika tanah pada tanah tercemar limbah industri berlogam berat	93
40.	Data pengukuran logam Zn dengan lima konsentrasi larutan seri menggunakan AAS.....	106
41.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_0U_2$	111
42.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_0U_3$	112
43.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_1U_1$	113
44.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_1U_2$	113
45.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_1U_3$	114
46.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_2U_1$	115
47.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_2U_2$	115
48.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_2U_3$	116
49.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_0U_1$	117
50.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_0U_2$	117
51.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_0U_3$	118
52.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_1U_1$	119
53.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_1U_2$	119
54.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_1U_3$	120
55.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_2U_1$	121
56.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_2U_2$	121
57.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_2U_3$	122
58.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_0U_1$	123

59.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₀ U ₂	123
60.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₀ U ₃	124
61.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₁ U ₁	125
62.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₁ U ₂	125
63.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₁ U ₃	126
64.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₂ U ₁	127
65.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₂ U ₂	127
66.	Analisis Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan S ₂ B ₂ U ₃	128
67.	Analisis Standard Error of the Mean (SEM) untuk perubahan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Zn akibat pemberian biochar sekam padi	129

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran peningkatan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat diperlakukan dengan <i>biochar</i> sekam padi.	8
2. Grafik Persamaan Isotermal Langmuir.....	15
3. Tata letak satuan percobaan di Sidosari, Lampung Selatan.	18
4. Tata letak satuan percobaan dalam Rancangan Acak Lengkap.	20
5. Teknik pengairan pot percobaan campuran contoh tanah dan <i>biochar</i>	21
6. Hubungan nilai b_{Cu} dengan K_{Cu} pada tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri	32
7. Isotermal Langmuir Cu pada tanah S_2	35
8. Isotermal Langmuir Cu pada tanah tercemar logam berat tanpa perlakuan <i>biochar</i> sekam padi (B_0).....	39
9. Isotermal Langmuir Zn pada tanah S_2	42
10. Kurva larutan standar Cu.....	72
11. Kurva larutan standar Zn.	73
12. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_0U_1$	73
13. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_0U_2$	74
14. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_0U_3$	75

15. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_1U_1$	75
16. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_1U_2$	76
17. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_1U_3$	77
18. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_2U_1$	77
19. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_2U_2$	78
20. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_0B_2U_3$	79
21. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_0U_1$	79
22. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_0U_2$	80
23. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_0U_3$	81
24. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_1U_1$	81
25. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_1U_2$	82
26. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_1U_3$	83
27. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_2U_1$	83
28. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_2U_2$	84
29. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_1B_2U_3$	85
30. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_0U_1$	85
31. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_0U_2$	86
32. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_0U_3$	87
33. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_1U_1$	87
34. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_1U_2$	88
35. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_1U_3$	89
36. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_2U_1$	89
37. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_2U_2$	90
38. Isotermal Langmuir logam Cu Perlakuan $S_2B_2U_3$	91

39.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Cu dengan ketersediaan Cu dalam tanah.	94
40.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Cu dengan pH tanah.	95
41.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Cu dengan C-organik tanah.....	96
42.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Cu dengan KTK tanah.....	97
43.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Cu dengan kadar liat dalam tanah.	98
44.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Cu dengan beberapa sifat kimia dan fisika tanah.	99
45.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Cu dengan ketersediaan Cu dalam tanah.	100
46.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Cu dengan pH tanah.	101
47.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Cu dengan C-organik tanah.	102
48.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Cu dengan KTK tanah.	103
49.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Cu dengan kadar liat dalam tanah.....	104
50.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Cu dengan beberapa sifat kimia dan fisika tanah.	105
51.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_0U_1$	111
52.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_0U_2$	112
53.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_0U_3$	112
54.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_1U_1$	113
55.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_1U_2$	114

56.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_1U_3$.	114
57.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_2U_1$.	115
58.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_2U_2$.	116
59.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_0B_2U_3$.	116
60.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_0U_1$.	117
61.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_0U_2$.	118
62.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_0U_3$.	118
63.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_1U_1$.	119
64.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_1U_2$.	120
65.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_1U_3$.	120
66.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_2U_1$.	121
67.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_2U_2$.	122
68.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_1B_2U_3$.	122
69.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_0U_1$.	123
70.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_0U_2$.	124
71.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_0U_3$.	124
72.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_1U_1$.	125
73.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_1U_2$.	126
74.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_1U_3$.	126
75.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_2U_1$.	127
76.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_2U_2$.	128
77.	Isotermal Langmuir logam Zn Perlakuan $S_2B_2U_3$.	128
78.	Analisis <i>Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Zn dengan ketersediaan Zn dalam tanah.	130

79.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Zn dengan pH tanah.	131
80.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Zn dengan C-organik tanah.	132
81.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Zn dengan KTK tanah.	133
82.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Zn dengan kadar liat dalam tanah.	134
83.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara kapasitas adsorpsi maksimum (b) Zn dengan beberapa sifat kimia dan fisika tanah.	135
84.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Zn dengan ketersediaan Zn dalam tanah.	136
85.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Zn dengan pH tanah.	137
86.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Zn dengan C-organik tanah.	138
87.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Zn dengan KTK tanah.	139
88.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Zn dengan kadar liat dalam tanah.	140
89.	<i>Analisis Simple Linear Regression</i> antara konstanta energi adsorpsi (K) Zn dengan beberapa sifat kimia dan fisika tanah.	141

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran tanah dan air menjadi salah satu penyebab degradasi lahan. Kegiatan industri meningkatkan pencemaran serta menurunkan produktivitas dan kualitas tanah dan air. Logam berat adalah salah satu jenis limbah industri yang tidak aman bagi lingkungan (Utomo dkk., 2016). Logam berat dapat berasal dari beberapa kegiatan industri seperti pertambangan, peleburan logam, serta limbah domestik dan penggunaan pupuk. Tembaga dan Seng merupakan logam berat yang banyak dihasilkan dari kegiatan industri. Toksisitas logam berat ini akan terlihat pada tubuh organisme dalam jumlah yang melebihi batas toleransi (Asria dan Hamid, 2021).

Logam berat dapat menyebar melalui berbagai media. Logam berat lebih mudah menyebar di udara dibandingkan di air, dan logam berat di air lebih *mobilitas* dibandingkan di dalam tanah. Dengan demikian, bahaya logam berat di dalam tanah lebih mudah ditekan. Melalui muatan negatifnya, tanah menjerap dan mengimobilisasi logam berat. Imobilisasi logam berat oleh koloid tanah tidak permanen, sehingga dapat terlepas ke larutan tanah dan dapat terserap akar tanaman. Ketersediaan logam berat di dalam tanah dapat berubah melalui penyerapan oleh akar tanaman, aliran massa, difusi dan pencucian serta limpasan air, erosi, dan pembajakan atau pengolahan yang dapat mempercepat pelepasan logam berat. Selain itu, penyerapan ion logam berat oleh akar tanaman juga mempengaruhi pergerakan logam berat di kompleks jerapan yang sebelumnya teradsorpsi sementara (Salam, 2021). Dengan demikian, diperlukan upaya peningkatan kapasitas dan energi jerapan tanah terhadap logam berat, agar lebih banyak logam berat yang dapat diimobilisasi (Salam, 2017).

Peningkatan kapasitas dan energi jerapan tanah menjadi upaya penting untuk meminimalisasi konsentrasi logam berat terlarut sehingga ketersediaannya tidak berlebihan dan bersifat toksik. Seperti telah diketahui, unsur Cu dan Zn merupakan unsur logam berat esensial yang dibutuhkan oleh tanaman, namun akan bersifat racun apabila ketersediaannya berlebihan (Widowati, 2008). Kapasitas dan energi jerap tanah menentukan ketersediaan logam berat ini untuk diserap akar tanaman (Yustinah, 2019).

Konsentrasi logam berat dapat diminimalisasi dengan beberapa upaya, salah satunya adalah penggunaan *biochar*. Melalui banyaknya kandungan karbon pada *biochar* sebagai hasil pembakaran bahan organik dengan sedikit atau tanpa oksigen (pirolisis), menjadikan *biochar* sebagai adsorben yang tepat dalam melakukan penjerapan atau adsorpsi logam berat. Selain itu, *biochar* juga memiliki daya tahan atau resisten yang lebih tinggi daripada bahan organik terhadap proses dekomposisi, sehingga lebih efektif untuk melakukan penjerapan logam berat dalam jangka waktu yang panjang (Sasmita dkk, 2021). *Biochar* yang memiliki sifat alkalin dapat meningkatkan pH tanah akibat penetralan ion H^+ oleh OH^- sehingga stabilisasi konsentrasi logam berat meningkat pada tanah dengan kemasaman yang tinggi (Hariyono, 2021). Ini dapat terjadi dengan peningkatan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat dengan penggunaan *biochar*. Dengan demikian, *biochar* dapat menjadi agen remediasi dalam menurunkan ketersediaan dan menghilangkan keaktifan logam berat dengan adanya peningkatan pH dan kapasitas adsorpsi (Hidayat, 2015).

Salah satu bahan baku *biochar* yang umum digunakan dan memiliki dampak yang optimal dalam menurunkan kelarutan logam berat dalam tanah adalah dengan menggunakan sekam padi. Ibrahim dkk (2016) dalam penelitiannya menyatakan bahwa penggunaan sekam padi sebagai bahan baku *biochar* optimal dalam upaya meminimalisasi konsentrasi logam berat khususnya Pb di larutan tanah. Sekam padi yang merupakan limbah hasil gilingan padi menjadi gabah mengandung 75-90% lignin dan selulosa (Kumar dkk, 2013). Kedua zat tersebut berperan penting dalam meningkatkan pH tanah dan menurunkan kelarutan logam berat dalam tanah. Hal tersebut karena ketika pada proses pembakaran sekam padi menjadi

biochar secara pirolisis, kandungan selulosa dan lignin dalam sekam padi akan membentuk *char* atau arang dan akan terjadi peningkatan kadar *fixed carbon* pada *biochar* akibat kadar volatil yang terlepas pada suhu tinggi. Semakin tinggi kandungan *fixed carbon*, semakin baik arang aktif atau *biochar* tersebut digunakan sebagai adsorben (Subarkhak dan Titah, 2023).

Biochar sekam padi pada penelitian Sasmita dkk (2021) yang dianalisis dengan uji proksimat menghasilkan kadar air, kadar abu, kadar volatil yang rendah, dan kandungan *fixed carbon* yang tinggi. Kandungan abu yang tinggi pada karbon aktif akan membuat pori-pori dari karbon aktif tersebut tertutup sehingga luas permukaan *biochar* akan menurun dan turut menurunkan kapasitas adsorpsi tanah terhadap logam berat (Maulina dan Iriansyah, 2018). Kadar volatil merupakan banyaknya senyawa non-karbon sebagai pengotor pada arang aktif atau *biochar*. Kadar *fixed carbon* yang tinggi menggambarkan senyawa pengotor yang menurunkan luas permukaan *biochar* semakin sedikit (Shi Xiang dkk., 2017). Selain itu, kandungan rasio C/N tinggi yaitu sekitar 39,5 menjadikan sekam padi lebih berpotensi dijadikan sebagai arang (*biochar*) daripada menjadi kompos. Rasio C/N *biochar* sekam padi yang tinggi, membuatnya mengandung lebih banyak karbon stabil sehingga akan bertahan lebih lama dan sukar terdekomposisi (Nurida dkk, 2017). Sekam padi juga biomassa dengan kandungan karbon bahan organik yang ringan dan sukar terurai, sehingga sangat berpotensi digunakan sebagai pembenah tanah (Haefele dkk, 2011).

Selain dari kandungannya yang memadai, penggunaan *biochar* sekam padi sebagai *biochar* dalam penelitian ini juga dilatarbelakangi oleh adanya peningkatan produksi tanaman pangan khususnya padi oleh karena adanya peningkatan jumlah penduduk. Subki dan Hasyim (2012) menyatakan bahwa potensi produksi sekam padi adalah 16%-21% dari *netto* beras yang diproduksi sehingga Indonesia memiliki hasil limbah pertanian berupa sekam padi yang juga melimpah. Dengan demikian, sekam padi berpotensi besar sebagai bahan baku pembuatan *biochar* dari aspek ketersediaan dan manfaatnya dalam memperbaiki kualitas tanah tercemar logam berat melalui mekanisme peningkatan kapasitas dan

energi jerapan tanah sehingga menjadi upaya pengendalian ketersediaan logam berat di larutan tanah agar tidak bersifat toksik (Sasmita dkk, 2021).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah terjadi perubahan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn akibat penambahan limbah industri pada tanah 26 tahun pascaperlakuan?
2. Apakah terjadi perubahan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat setelah diperlakukan *biochar* sekam padi?
3. Apakah perubahan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah dipengaruhi oleh beberapa sifat tanah?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari perubahan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn akibat penambahan limbah industri pada tanah 26 tahun pascaperlakuan.
2. Mempelajari perubahan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn setelah diperlakukan *biochar* sekam padi.
3. Mempelajari korelasi kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah dengan beberapa sifat tanah.

1.4 Kerangka Pemikiran

Tanah di Sidosari, Natar, mengalami pencemaran logam berat Cu dan Zn sejak 26 tahun lalu akibat perlakuan industri sendok logam dari PT *Star Metal Ware Industry*, Jakarta. Pada dasarnya unsur logam tertentu seperti Cu dan Zn dengan konsentrasi normal tidak akan bersifat toksik, bahkan menjadi unsur hara mikro esensial. Sebagai contoh, total Cu dalam tanah tidak boleh melebihi 60 mg kg^{-1} ,

total Zn terlarut dalam tanah tidak boleh melebihi 70 mg kg^{-1} , dan total Cd dan Pb terlarut masing-masing terlarut tidak boleh melebihi 9 dan 100 mg kg^{-1} (Ross, 1994 dalam Salam, 2017). Hal tersebut juga sesuai dengan pernyataan Salam dan Ginanjar (2018), yang menyatakan bahwa secara berturut turut konsentrasi logam Cu dan Zn supaya tidak menjadi polutan tidak boleh melebihi 60 mg kg^{-1} dan harus berada di bawah 70 mg kg^{-1} . Lahan penelitian ini telah menerima perlakuan limbah industri logam berat dengan kandungan Cu 754 mg kg^{-1} dan Zn $44,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (Salam dkk., 1998). Oleh karena lahan penelitian pertama kali mendapat perlakuan logam berat Cu dan Zn dengan konsentrasi yang berada di atas ambang batas toleransi atau nilai baku mutu lingkungan yang ditetapkan untuk kandungan logam berat maka ketersediaannya harus dikendalikan. Demikian juga lahan lain yang serupa.

Akumulasi logam berat dengan konsentrasi tinggi dapat berdampak pada penurunan aktivitas mikroorganisme tanah, kesuburan dan kualitas tanah, serta penurunan hasil dan masuknya bahan beracun ke rantai makanan (Hidayat, 2015). Oleh karena itu, logam berat tersebut harus diturunkan. Upaya yang dapat dilakukan untuk menurunkan ketersediaan logam berat adalah meningkatkan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat Cu dan Zn tanah. Penambahan *biochar* diduga dapat menurunkan kelarutan logam berat dengan meningkatkan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat dan menurunkan konsentrasinya di larutan tanah. Penurunan ketersediaan logam berat melibatkan proses adsorpsi dan presipitasi (Salam dkk., 2021).

Biochar memiliki luas permukaan yang besar dan bersifat porous serta gugus fungsional yang berpotensi menurunkan ketersediaan logam berat di dalam tanah (Hidayat, 2015). *Biochar* mengandung gugus fungsi seperti hidroksil, metil, karbonil, dan karboksil (Fuerters dkk., 2010). Gugus karboksil pada *biochar* menentukan jumlah logam berat yang mampu diikat dan akan meningkatkan pH dan KTK tanah sehingga terjadi peningkatan kapasitas jerap terhadap logam berat yang dapat menurunkan kelarutan logam berat dalam tanah (Salam dan Ginanjar, 2018). Salam (2017) menyatakan bahwa kenaikan pH dan KTK tanah dengan pemberian *biochar* akan turut meningkatkan adsorpsi (penjerapan) sehingga

mempengaruhi mobilisasi logam berat. Sesuai dengan pernyataan Salam (2020), Kapasitas Tukar Kation adalah parameter yang menyatakan besaran daya jerap tanah terhadap suatu kation.

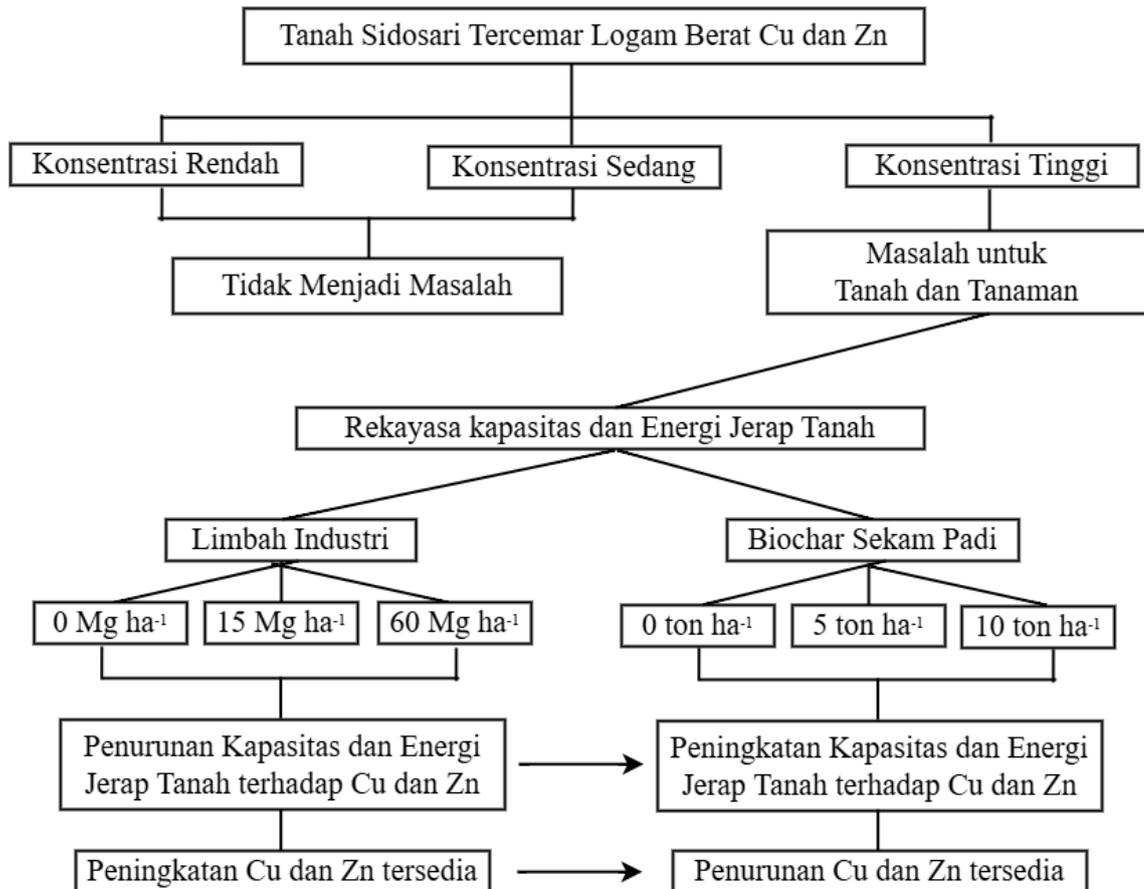
Peningkatan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap Cu dan Zn oleh pemberian *biochar* sekam padi secara tidak langsung akan menurunkan ketersediaan Cu dan Zn di larutan tanah, sehingga konsentrasinya tidak lagi menjadi masalah bagi tanah dan tanaman. Li et al (2023) juga menyatakan bahwa hubungan negatif tersebut juga berlaku terhadap tanah apabila dilakukan pengaplikasian limbah industri yang akan meningkatkan konsentrasi logam berat di larutan tanah melalui penurunan kapasitas (b) dan energi jerap (K) tanah terhadap logam berat yang dalam hal ini adalah Cu dan Zn.

Penelitian Astanda dkk (2016) menunjukkan bahwa terjadi kesetimbangan adsorpsi logam Cu dengan menggunakan *biochar* dari ampas tebu sebagai adsorben dengan persentase adsorpsi *biochar* sebesar 97,1%. Hal tersebut cukup menggambarkan *biochar* sebagai adsorben yang baik karena memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap logam berat. Selain itu, dari penelitian Muna (2011) terlihat bahwa adsorpsi *biochar* dari batang pisang sebanyak 1 gram sebagai adsorben untuk logam berat diperoleh efisiensinya sebesar 51,02% dengan model isotherm adsorpsi Langmuir dan kinetika adsorpsi orde satu. Fajri dkk (2021) dalam penelitiannya menyatakan bahwa penambahan *biochar* sekam padi sebanyak 15% yang diinkubasi selama 30 hari mampu meningkatkan adsorpsi logam berat Cd sebesar 45,45%. Dari hasil penelitian Anggriani dkk (2021) didapatkan kecepatan adsorpsi *biochar* sebagai adsorben berbanding lurus dalam penurunan konsentrasi logam tembaga (Cu) dan timbal (Pb). Dengan demikian, kapasitas adsorpsi (b) yang tinggi dari pengaplikasian *biochar* akan menurunkan konsentrasi atau ketersediaan logam berat di larutan tanah.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa lahan penelitian telah mengalami pencemaran oleh logam berat Cu 754 mg kg⁻¹ dan Zn 44,5 mg kg⁻¹ akibat limbah industri sejak 26 tahun lalu (Salam dkk., 1998). Dalam penelitian MeiSandi (2023) pada lahan yang sama konsentrasi Cu dan Zn tersedia di dalam tanah secara umum menurun seiring dengan meningkatnya perlakuan dosis

limbah industri. Hal tersebut dikarenakan dengan bertambahnya waktu sebagian logam berat yang mengalami translokasi disertai adanya perlakuan kompos dan kapur pada waktu yang bersamaan, membuat pengaruh konsentrasi logam berat Cu dan Zn tidak terlalu signifikan terhadap ketersediaannya di larutan tanah. Penelitian Wirakrama (2023) pada lahan yang sama, menunjukkan bahwa pemberian berbagai jenis *biochar* (sekam padi dan tongkol jagung) tidak mempengaruhi Cu dan Zn tersedia di dalam tanah. Namun, pada penelitian Dani (2023) terlihat bahwa serapan Cu dan Zn terendah oleh rumput gajah terjadi pada limbah industri konsentrasi tertinggi yaitu 60 Mg ha^{-1} . Dengan demikian, disimpulkan bahwa pemberian limbah industri logam berat Cu dan Zn dosis tinggi akan meningkatkan ketersediaan logam berat dalam larutan tanah melalui penurunan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat Cu dan Zn.

Adapun mekanisme penurunan kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K) tanah terhadap logam berat disebabkan oleh adanya penambahan limbah industri yang mengandung logam berat Cu dan Zn dengan berbagai konsentrasi sehingga adsorben menjadi jenuh dan membuat kapasitas adsorpsinya menurun karena tidak ada lagi ruang pori pada permukaan adsorben sebagai tempat menjerap logam berat dan kapasitas adsorpsi maksimum telah tercapai. Konstanta energi adsorpsi (K) berbanding terbalik dengan proses adsorpsi, yaitu semakin kecil nilai K maka semakin cepat proses adsorpsi itu berlangsung. Dengan demikian, nilai K atau energi kekuatan ikatan yang kecil akan membuat waktu penjerapan adsorbat pada permukaan adsorben juga semakin lemah, sehingga akan sulit mencapai titik kesetimbangan oleh karena mudah terlepasnya ion logam tersebut dan akan meningkatkan konsentrasi logam berat di larutan tanah (Anggriani dkk, 2021). Kerangka pemikiran pada penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran peningkatan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat diperlakukan dengan *biochar* sekam padi.

1.5 Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah disajikan, maka hipotesis dari penelitian ini yaitu:

1. Terjadi penurunan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn akibat penambahan limbah industri pada tanah 26 tahun pascaperlakuan.
2. Terjadi peningkatan kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat setelah diperlakukan *biochar* sekam padi.
3. Kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah berkorelasi dengan beberapa sifat kimia dan fisika tanah.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Tanah dan Air oleh Logam Berat

Logam terbagi atas logam berat dengan berat jenis lebih dari 5 g/cm^3 (logam berat esensial dan logam berat non-esensial) serta logam ringan dengan berat jenis kurang dari 5 g/cm^3 . Konsentrasi logam berat pada tingkat normal tidak bersifat *toxic* (Irianti dkk., 2017). Pencemaran logam berat pada tanah dan air akan mengganggu kehidupan. Pertumbuhan salada, kangkung, dan caisim, terganggu karena tidak toleran terhadap cemaran logam berat (Silva dkk., 2021).

Logam berat memiliki sifat mudah terabsorpsi dan tidak dapat terurai (Susantoro dan Andayani, 2019). Logam berat bentuk ion akan mudah diserap akar tanaman bersamaan dengan unsur hara lainnya. Pada tubuh manusia, logam berat masuk melalui makanan, air minum, dan udara (Irianti dkk., 2017). Pada ekosistem perairan, logam berat akan membentuk endapan yang berbahaya apabila makhluk hidup yang menggunakannya untuk sehari-hari (Karbassi, 2018).

Pencemaran tanah oleh logam berat terjadi dimana-mana. Pencemaran logam berat pada tanah dapat terjadi di area industri dan pabrik-pabrik yang mengolah logam dengan limbahnya berpotensi mengandung logam berat dan mencemari tanah. Limbah industri berkontribusi besar terhadap pencemaran logam berat (Khasanah dkk., 2021). Selain itu, pencemaran oleh logam berat dapat juga terjadi di lokasi pertambangan yang tanahnya cenderung akan tercemar akibat proses penambangan dan pengolahan logam seperti emas, tembaga, dan nikel. Tanah pada daerah dengan kegiatan pertanian yang intensif juga berpotensi mengalami pencemaran logam berat akibat adanya penggunaan pestisida, herbisida, dan pupuk kimia melalui penumpukan logam berat dalam tanah. Sama halnya di area

industri, wilayah yang terkena dampak bencana seperti tumpahan minyak, kebocoran limbah industri, atau pencemaran sungai juga menyebabkan penyebaran logam berat ke tanah. Tempat pembuangan limbah sampai pada kawasan perkotaan juga berpotensi mengalami pencemaran oleh logam berat melalui aktivitas industri, penggunaan transportasi dan bahan bakar fosilnya. Pada dasarnya aktivitas di area penambangan, pertanian, dan industri sangat berpotensi meninggalkan residu yang akan dibuang atau ditimbun di dalam tanah, sehingga akan meningkatkan kandungan logam berat di dalam tanah yang secara terus menerus akan terakumulasi dan menyebabkan pencemaran logam berat pada tanah (Hatika, 2022).

2.2 Kapasitas (b) dan Energi (K) Jerap untuk Penurunan Logam Berat dalam Tanah

Diperlukan upaya untuk menurunkan dampak negatif dari logam berat melalui penurunan keberadaan logam berat dari bentuk ion bebas menjadi bentuk tidak tersedia. Hal tersebut dapat dilakukan melalui beberapa mekanisme, seperti proses penyerapan atau pencucian oleh akar tanaman, logam berat terjerap dalam bentuk senyawa kompleks atau kompleksasi, khelasi, pengendapan atau adsorpsi. Tingginya logam berat dalam tanah harus diatasi, salah satunya adalah dengan adsorpsi oleh tanah. Kemampuan tanah dalam adsorpsi logam berat ditentukan oleh kapasitas jerap maksimum (b) dan konstanta energi jerap (K), yang merupakan kemampuan tanah dalam melakukan pengikatan dan penahanan terhadap ion-ion dalam larutan tanah sehingga tidak tersedia untuk diserap akar tanaman (Yustinah dkk., 2019).

Kapasitas dan energi jerap berkaitan dengan kemampuan adsorpsi suatu tanah terhadap adsorbat pada permukaan adsorben (Miri dan Narimo, 2022). Kapasitas adsorpsi maksimum (b) merupakan jumlah maksimum atau banyaknya kation yang dalam hal ini adalah logam berat untuk dapat diadsorpsi oleh sejumlah adsorbat pada suatu permukaan (adsorben) yang berlangsung secara keseimbangan dengan proses desorpsi. Kapasitas adsorpsi maksimum terjadi oleh karena adanya lapisan tunggal atau *monolayer* adsorbat di permukaan adsorben.

Konstanta energi adsorpsi (K) dalam persamaan Isotermal Langmuir adalah energi atau kekuatan ikatan antara zat yang diadsorpsi dengan permukaan penjerap (adsorben). Semakin tinggi nilai konstanta energi adsorpsi (K), menggambarkan semakin kuat ikatan antara zat yang diadsorpsi dengan permukaan penjerap (adsorben). Dengan demikian, disimpulkan bahwa kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah merupakan jumlah maksimum suatu zat atau kation yang dalam hal ini digambarkan sebagai logam berat yang dapat ditahan oleh permukaan penjerap (adsorben) dengan dipengaruhi oleh energi ikatan antara kation yang dijerap dengan permukaan penjerap (adsorben) dan dilatarbelakangi oleh beberapa faktor baik dari faktor adsorbat maupun adsorben itu sendiri (Salam, 2023).

Dari segi adsorben (permukaan penjerap), kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K) dipengaruhi oleh jenis adsorben yang didasarkan pada efektivitasnya dalam menjerap suatu zat, selektivitasnya terhadap jenis bahan pencemar tertentu, tingginya persen regenerasi, dan mudah tidaknya adsorben tersebut mengalami biodegradasi. Selain itu, juga dipengaruhi oleh jenis adsorbat atau zat yang diserap, terutama konsentrasi adsorbat dengan semakin tinggi konsentrasi awal dari adsorbat, semakin cepat kapasitas adsorpsi maksimum tercapai (Handayani dan Sulistiyono, 2009). Faktor paling penting antara keduanya (adsorbat dan adsorben) adalah faktor muatan. Sebagaimana diatur oleh Hukum Coloumb yang merepresentasikan adanya gaya elektrostatis dalam sebuah sistem akibat dua buah muatan listrik dengan dipengaruhi oleh faktor muatan dan faktor jarak. Semakin tinggi salah satu muatan, semakin tinggi pula gaya tarik menarik atau tolak menolak yang ditimbulkan sehingga menjadi salah satu mekanisme pendukung dalam terjadinya proses reaksi adsorpsi. Dalam proses adsorpsi, terdapat juga faktor pendukung kapasitas (b) dan energi (K) jerap suatu tanah lainnya, seperti faktor pH, KTK, dan luas permukaan mineral suatu tanah (Salam, 2023).

Peningkatan kapasitas dan energi jerap tanah dapat menurunkan konsentrasi logam berat sehingga konsentrasi logam berat dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan tanaman (Salam, 2017). Semakin luas permukaan aktif pada suatu mineral tanah, semakin tinggi tanah menjerap ion-ion (Salam dkk., 1997).

Beberapa cara untuk menaikkan kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat adalah dengan pengapuran, pemberian bahan organik, dan pemanfaatan limbah pertanian dalam bentuk *biochar* sebagai alternatif pembenah tanah (Sasmita dkk., 2021).

2.3 Pengaruh *Biochar* terhadap Kapasitas (b) dan Energi (K) Jerap Logam Berat

Kemampuan tanah dalam menjerap logam berat tidak hanya dipengaruhi oleh permukaan aktif pada mineral tanah, dapat juga dengan memodifikasi proses-proses yang terjadi di dalam sistem tanah. Penambahan kapur atau bahan organik mampu meningkatkan kapasitas (b) dan energi (K) jerap logam berat (Salam dkk., 1997). Penambahan bahan tersebut akan mengaktifkan berbagai gugus fungsional yang terdapat di dalam tanah sehingga terjadi peningkatan pada pH tanah dan karenanya ada peningkatan muatan negatif tanah. Peningkatan tersebut dapat dilakukan dengan penambahan liat, zeolit, bahan organik, atau *biochar*, sehingga akan meningkatkan retensi dan penjerapan logam (Salam, 2017).

Biochar adalah hasil pembakaran limbah pertanian secara *pyrolysis* (pasokan oksigen terbatas pada suhu di bawah 700⁰C) supaya terjadi karbonisasi tanpa pembakaran lengkap (Tambunan dkk., 2014). *Biochar* sebagai sumber bahan organik dengan sifat stabil yang dapat menjadi pembenah tanah (Hidayat, 2015). *Biochar* bersifat alkalin karena merupakan bahan basa yang dapat membuat logam berat menjadi bentuk tidak tersedia di dalam tanah dengan membuatnya terikat ke dalam koloid tanah sehingga berkontribusi dalam menurunkan kelarutan logam berat (Khan dkk., 2018). *Biochar* mengandung gugus fungsi seperti hidroksil, metil, karbonil, dan karboksil (Fuerters dkk., 2010). Gugus karboksil pada *biochar* menentukan jumlah logam berat yang mampu diikat dan akan meningkatkan pH dan KTK tanah sehingga kapasitas jerap terhadap logam berat meningkat seiring dengan menurunnya kelarutan logam berat (Salam dan Ginanjar, 2018).

Biochar mampu menurunkan kemasaman tanah, sehingga semakin meningkatkan pH suatu tanah, maka akan semakin menurunkan kelarutan logam berat pada tanah tersebut dan semakin tinggi suhu tanah maka semakin meningkatkan kelarutan logam berat (Anzori dkk., 2019). Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Salam (2017), bahwa penjerapan logam berat sangat bergantung pada pH tanah yang kapasitas jerapannya akan turut meningkat seiring dengan peningkatan pH. Di sisi lain, semakin kecil ukuran partikel yang dimiliki *biochar*, semakin banyak ruang pori dan luas permukaan adsorbennya sehingga semakin meningkat kemampuannya dalam menjerap logam berat (Xie dkk., 2015).

2.4 Peran *Biochar* Sekam Padi dalam Menurunkan Kelarutan Logam Berat

Pemanfaatan sekam padi sebagai limbah pertanian menjadi *biochar* dapat meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman melalui perbaikannya terhadap sifat-sifat tanah dan mampu mengimobilisasi logam berat sehingga tidak menjadi polutan toksik (Lebrun dkk., 2018). Proporsi ketersediaan sekam padi sebesar 16-28% dari jumlah gabah kering giling. Sekam padi sebagai *biochar* banyak mengandung unsur hara seperti C-Organik (20,93%), N (0,71%), P (0,06%), dan K (0,14%) (Karamina dkk., 2022). Sekam padi mengandung 75-90% bahan organik (selulosa dan lignin), mineral silika, dan unsur mikro lainnya (Kumar dkk., 2013).

Biochar yang memiliki pH basa dengan kandungan kation-kation basa seperti Ca, K, Mg, dan Na, mampu meningkatkan konsentrasi ion OH⁻ yang akan bereaksi dengan ion H⁺ membentuk H₂O lalu meningkatkan pH karena konsentrasi ion H⁺ nya menurun (Arifin dkk., 2022). Reaksi (pH) tanah tinggi akibat *biochar* menjadikan adanya kompetisi antara ion H⁺ dengan logam berat yang terikat pada permukaan jerapan koloid tanah. Oleh karena ion H⁺ telah berikatan dengan OH⁻, maka penjerapan tanah terhadap logam berat di koloid tanah meningkat (Bachtiar dkk., 2019). Semakin banyak dosis *biochar* sekam padi yang diberikan, artinya semakin banyak jumlah masukan muatan negatif tanah sehingga meningkatkan pH dan retensi logam berat pada tanah (Salam, 2017).

2.5 Persamaan Isotermal Langmuir untuk Adsorpsi Logam Berat

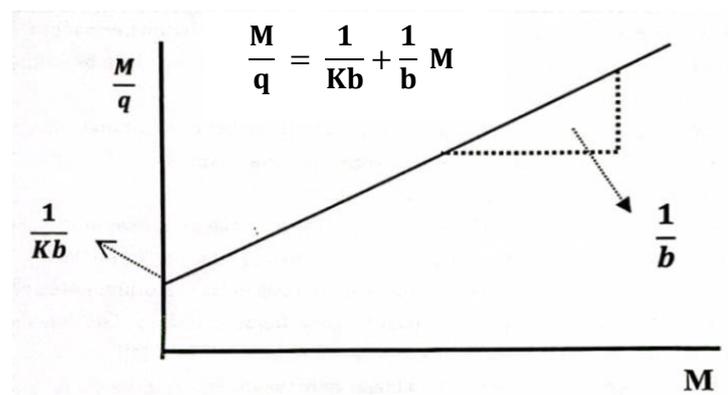
Penjerapan logam berat dengan *biochar* terjadi melalui proses adsorpsi. Adsorpsi dipengaruhi oleh faktor dari *biochar* (bahan baku, suhu pembakaran) dan jenis polutannya (logam berat). Suhu pembakaran berpengaruh pada peningkatan luas permukaan *biochar* dan menurunkan jumlah gugus fungsi yang mengandung oksigen sehingga lebih efisien menyerap logam berat dibandingkan dengan karbon aktif (Ambaye dkk., 2021). Adsorpsi *biochar* untuk menghilangkan polutan anorganik seperti logam berat didasarkan pada interaksi elektrostatik, pertukaran ion, pengisian pori-pori dan pengendapan (Fuentes dkk., 2010).

Adsorpsi merupakan peristiwa pengikatan oleh padatan tertentu yang dalam hal ini adalah *biochar* terhadap zat tertentu yang dalam hal ini adalah logam berat yang terjadi karena zat permukaan *biochar* terdapat gaya tarik atom. Dalam hal ini, *biochar* dikatakan sebagai adsorben dan logam berat sebagai adsorbat. *Biochar* menjadi padatan yang efektif dalam mengadsorpsi logam berat karena memiliki luas permukaan yang sangat porous dan butiran yang sangat halus (Hidayat, 2015). Metode Isotermal Langmuir umum digunakan dengan mengevaluasi nilai adsorpsi antara adsorbat (logam) dengan adsorben (*biochar*). Metode Isotermal Langmuir merupakan metode yang digunakan untuk dilakukannya pemisahan antara tanah dan larutan yang akan dianalisis kapasitas jerapan maksimum Cu dan Zn tersedia (Yusran, 2010). Model ini mengasumsikan bahwa distribusi adsorpsi oleh tanah bersifat homogen dan ion teradsorpsi juga diasumsikan tidak saling berinteraksi.

Persamaan Isotermal jerapan Langmuir yaitu $M/q = 1/Kb + 1/b M$, dengan M/q adalah indeks adsorpsi logam berat, M merupakan konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan, q adalah total logam berat teradsorpsi, K merupakan konstanta energi ikatan atau energi adsorpsi, dan b adalah kapasitas adsorpsi maksimum. Kapasitas (b) dan energi (K) jerap tanah terhadap logam berat dihitung dari nilai kemiringan dan intersep. Nilai kapasitas adsorpsi maksimum (b) didapatkan dari nilai kemiringan (*slope*) garis, sedangkan nilai konstanta energi ikatan (K) didapatkan dari intersep sumbu Y. Nilai b dan K dapat

menyatakan perbandingan kapasitas adsorpsi antara tanah dan antara perlakuan dan juga kekuatan adsorpsi berbagai unsur (Salam, 2023). Proses penjerapan suatu zat oleh adsorben dalam fungsi waktu dinyatakan dalam kinetika adsorpsi (Anggriani dkk., 2021). Laju adsorpsi dinyatakan sebagai kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat yang dapat diketahui dari konstanta laju adsorpsi (K) dan orde reaksi yang dihasilkan dari suatu model kinetika adsorpsi (Hafiyah, 2013).

Penggunaan AAS akan menghasilkan data konsentrasi Cu dan Zn total, larut, dan terjerap, sebagai masukan atau *input* untuk persamaan Isotermal Langmuir. Berikut adalah persamaan Isotermal Langmuir untuk menganalisis penjerapan logam berat dalam mencari nilai kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan konstanta energi adsorpsi (K) (Gambar 2):



Gambar 2. Grafik Persamaan Isotermal Langmuir.

Adapun keterangan persamaan tersebut, yaitu $M/q = 1/Kb + 1/b M$; M/q = Indeks Adsorpsi Logam Berat; M = Konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (mg l^{-1}); K = Konstanta Energi Adsorpsi; b = Kapasitas Adsorpsi Maksimum (mg kg^{-1}); q = Total Logam berat teradsorpsi (mg kg^{-1}). Grafik tersebut menggambarkan hubungan antara perbandingan konsentrasi ion dalam larutan (C) terhadap fraksi ion terjerap pada koloid tanah (C/q) dengan konsentrasi ion tersebut dalam larutan tanah (C) dengan satu lapis adsorpsi. Persamaan tersebut digambarkan sebagai persamaan garis lurus linear $y = a+zx$ dengan koefisien korelasi R^2 . Persamaan $y = a+zx$ (diperoleh dengan

menggunakan aplikasi Excel) dengan $y = M/q$ dan $x = M$; $M = 1/b$ dan $b = 1/m$; $A = 1/Kb$ dan $K=1/ab$ (Salam, 2023).

Kemiringan garis $z = 1/b$ sehingga nilai adsorpsi maksimum b dapat dihitung dengan formula $b = 1/z$. Intersep $a = 1/Kb$ sehingga nilai energi adsorpsi K dapat dihitung dengan formula $K = 1/ab$. Nilai K dan b dapat digunakan untuk membandingkan pengaruh perlakuan percobaan (Salam, 2023).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

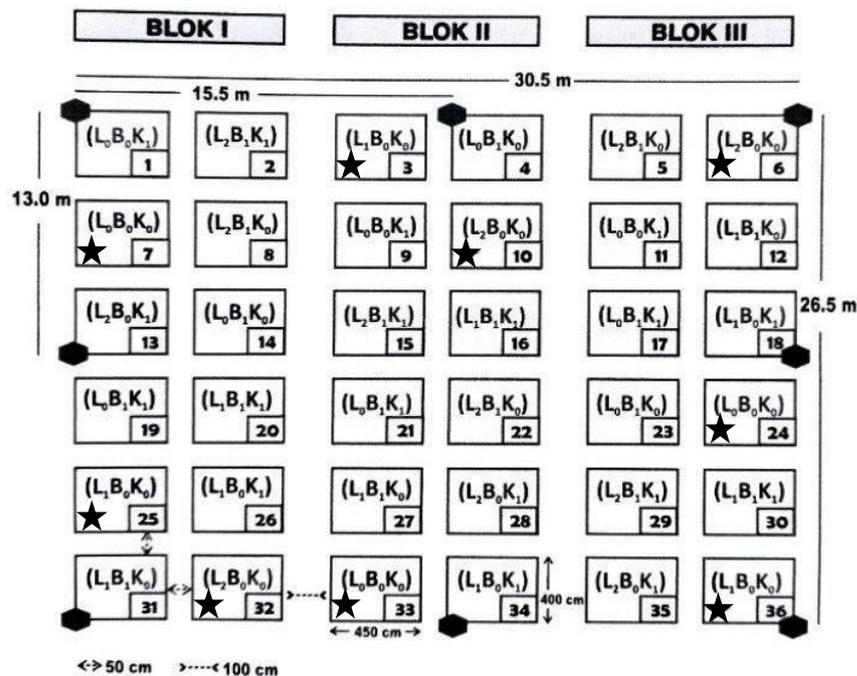
Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Mei sampai dengan November 2024. Contoh tanah didapatkan dari petak percobaan yang terletak di Sidosari, Kecamatan Natar, Lampung Selatan. Percobaan dilaksanakan di rumah kaca Perguruan Tinggi Al-Madani, Rajabasa, Bandar Lampung. Analisis tanah dilakukan di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Analisis logam Cu dan Zn dilakukan di Laboratorium Lingkungan, Dinas Lingkungan Hidup, Provinsi Lampung. Lahan percobaan merupakan penelitian berkelanjutan yang telah dilaksanakan selama 26 tahun sejak 1998.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan di antaranya pot plastik, flanel, papan penyangga, bak atau rak penampung air, ayakan tanah, timbangan, botol film, botol kocok, labu ukur, labu didih, pipet, labu erlenmeyer, spatula, gelas beaker, gelas ukur, mortal dan alu, kantung plastik, kertas label, kertas saring, pH-meter, hidrometer, termometer, sentrifugator, *shaker*, *Flame Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dengan merek Shimadzu AA-7000 nomor serial A309252 (Laboratorium Lingkungan), dan alat tulis. Bahan-bahan yang digunakan di antaranya, contoh tanah tercemar logam berat, *biochar* sekam padi, aquades, larutan induk Cu dan Zn 1000 ppm, pengekstrak asam nitrat (HNO_3) 1 N, larutan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1 N, H_2SO_4 , H_3PO_4 , NaF 4%, indikator difenilamin, larutan Amonium Ferosulfat $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ 0,5 N, pengekstrak NH_4OAc 1 N, alkohol 96%, bromkesol hijau, metil merah, etanol, NaCl 10%, HCl 1 N, NH_4OAc 0,01 N, NaOH 40%, HCl 0,1 N, asam borat, pengekstrak H_2O dan KCl, dan larutan *calgon*.

3.3 Sejarah Lahan Pengambilan Contoh Tanah

Pada bulan Juli 1998, lahan di Desa Sidosari, Natar, Lampung Selatan, mendapat perlakuan limbah (L) 0 Mg ha⁻¹ (L₀), 15 Mg ha⁻¹ (L₁), dan 60 Mg ha⁻¹ (L₂); kompos daun singkong (B) 0 Mg ha⁻¹ (B₀) dan 5 Mg ha⁻¹ (B₁); kapur (K) 0 Mg ha⁻¹ (K₀) dan 5 Mg ha⁻¹ (K₁) CaCO₃, yang diaplikasikan cara dibajak serta digaru sebanyak 2 kali hingga kedalaman 20 cm (Gambar 3). Limbah industri sendok logam berasal dari PT *Star Metal Ware Industry*, Jakarta, dengan pH basa sekitar 7,30; kandungan logam berat Cu 754 mg kg⁻¹ dan Zn 44,5 mg kg⁻¹ (Salam dkk., 1998). Kompos daun singkong berasal dari perkebunan singkong PT *Nusantara Tropical Fruits* di Way Jepara, Lampung Timur (Salam dkk., 2021). Lahan percobaan memiliki ordo tanah Ultisol. Komoditas jagung, padi gogo, singkong, dan kacang tanah menjadi tanaman pertama yang ditanam secara bergantian dengan diselingi masa bera. Masa bera merupakan kondisi tanah dalam masa berhenti atau istirahat (Suryanto dkk., 2006). Untuk memudahkan pengolahan tanah, batas antarpetak percobaan ataupun antarblok diabaikan (*imaginer*), namun ditandai pada beberapa titik untuk keperluan sampling (Ginanjar, 2009).



Gambar 3. Tata letak satuan percobaan di Sidosari, Lampung Selatan. (L=limbah industri, L₀=0 Mg ha⁻¹; L₁=15 Mg ha⁻¹; L₂=60 Mg ha⁻¹; B=Kompos daun singkong, B₀=0 Mg ha⁻¹, B₁=5 Mg ha⁻¹, dan K=Kapur (CaCO₃), K₀=0 Mg ha⁻¹, K₁=5 Mg ha⁻¹).

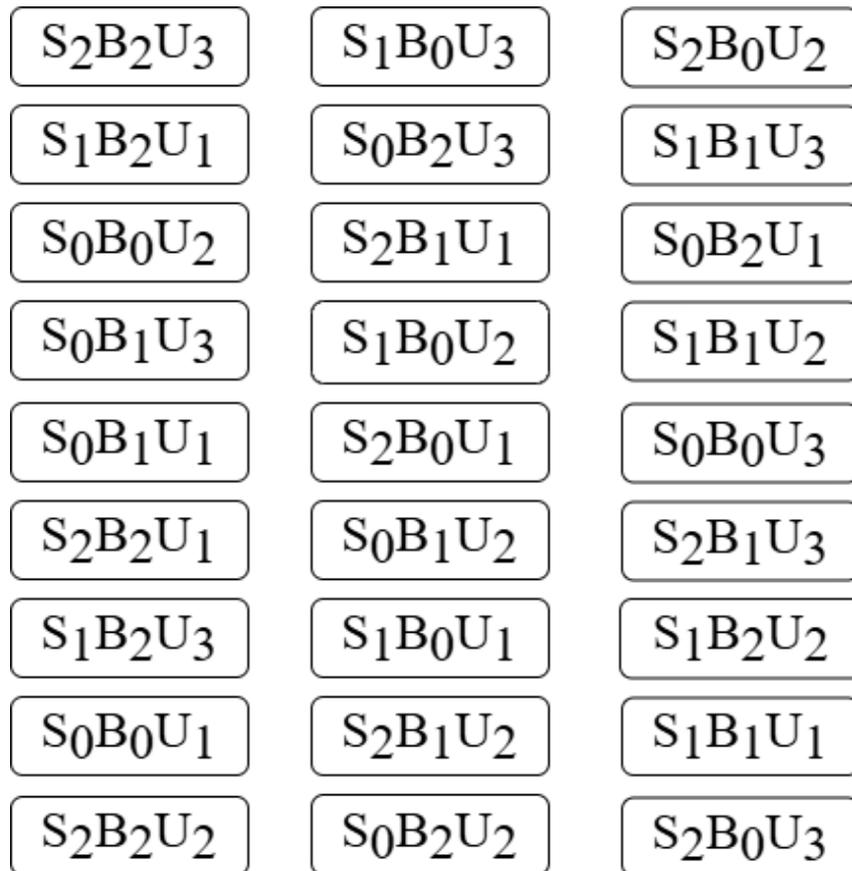
3.4 Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan secara faktorial dengan menggunakan 2 faktor dalam Rancangan Acak Lengkap (RAL) (Gambar 4). Faktor pertama adalah contoh tanah dengan riwayat perlakuan dosis limbah industri (S) yang terdiri dari tanah Sidosari tidak tercemar logam berat takaran 0 Mg ha^{-1} (S_0) atau kontrol, tercemar limbah takaran 15 Mg ha^{-1} (S_1) atau konsentrasi rendah, dan takaran 60 Mg ha^{-1} (S_2) atau konsentrasi tinggi. Faktor kedua yaitu *biochar* berbahan sekam padi (B) dengan dosis 0 Mg ha^{-1} (B_0); 5 Mg ha^{-1} (B_1); dan 10 Mg ha^{-1} (B_2). Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali (U_1 , U_2 , dan U_3) sehingga terdapat 27 satuan percobaan. Contoh tanah (S) adalah dari petak dengan perlakuan limbah industri tanpa perlakuan kompos dan kapur (B_0 dan K_0) (Salam dkk., 1998) (Gambar 3).

3.5 Pelaksanaan Penelitian

3.5.1 Penyiapan Contoh Tanah

Contoh tanah diambil dari lahan percobaan di Desa Sidosari, Natar, Lampung Selatan, dengan kedalaman 0-15 cm. Contoh tanah diambil dari perlakuan limbah industri tanpa perlakuan kapur dan kompos (B_0 dan K_0). Contoh tanah dikeringudarkan, dihaluskan, diaduk rata dan diayak menggunakan ayakan 2 mm untuk menghilangkan kerikil dan sisa-sisa tanaman, kemudian ditimbang sebanyak 200 gram per satuan percobaan lalu dimasukkan ke dalam pot plastik.



Gambar 4. Tata letak satuan percobaan dalam Rancangan Acak Lengkap.

Keterangan:

S₀: Tanah tanpa riwayat perlakuan limbah industri logam berat (0 Mg ha⁻¹)

S₁: Tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri logam berat konsentrasi rendah (15 Mg ha⁻¹)

S₂: Tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri logam berat konsentrasi tinggi (60 Mg ha⁻¹)

B₀: Tanah tanpa perlakuan *biochar* atau kontrol (0 Mg /ha)

B₁: Tanah dengan perlakuan *biochar* dosis rendah (5 Mg /ha)

B₂: Tanah dengan perlakuan *biochar* dosis tinggi (10 Mg /ha)

U₁: Ulangan 1

U₂: Ulangan 2

U₃: Ulangan 3

3.5.2 Pembuatan *Biochar*

Biochar sekam padi dibuat dengan metode terbuka melalui penggunaan cerobong berbahan kawat sebagai tempat bara api dihidupkan. Gulungan kawat memiliki diameter sekitar 20 cm, ukuran lubang 1 cm x 1 cm dengan tinggi 1,5 m. Sekam padi mengitari sisi cerobong, lalu dibuat bara api dengan pembakaran kertas atau

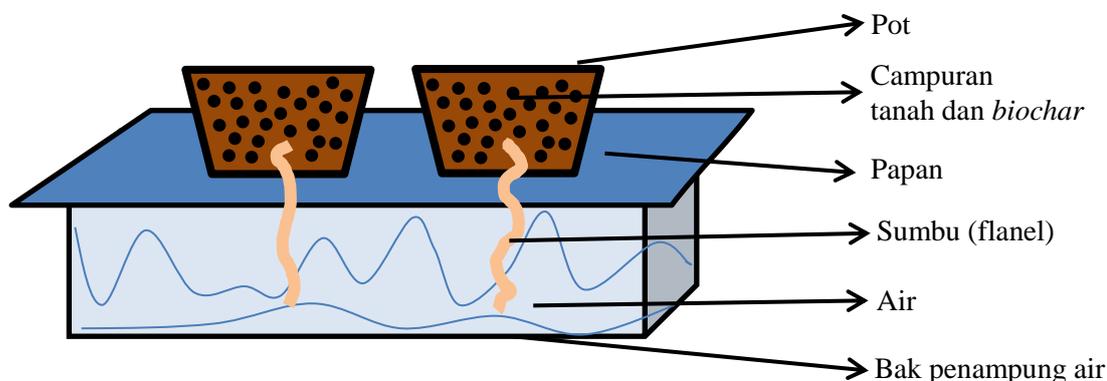
daun kering. Pembakaran membutuhkan waktu sekitar 4-5 jam, sehingga bara api perlu dijaga. Sekam padi sesekali dibalik sehingga *biochar* terbakar secara merata.

3.5.3 Pengaplikasian *Biochar*

Biochar sekam padi diaplikasikan pada tiap satuan percobaan berupa pot yang telah berisi 200 g tanah tercemar logam berat. Dosis *biochar* sekam padi yang ditambahkan ke dalam pot tersebut harus disesuaikan dengan banyaknya tanah tercemar logam berat yang digunakan (200 g BKO 105⁰C). Dengan demikian, dari yang sebelumnya dosis *biochar* dalam satuan Mg ha⁻¹ yaitu 0 Mg ha⁻¹ (S₀); 15 Mg ha⁻¹ (S₁); dan 60 Mg ha⁻¹ (S₂) dikonversi menjadi satuan gram per satu pot plastik yaitu dengan banyaknya *biochar* yang diaplikasikan sebanyak B₀ = 0 g/200 g, B₁ = 0,5 g/200 g, B₂ = 1,0 g/200 g setara Berat Kering Oven. *Biochar* dihomogenkan di atas lembaran plastik bersih dengan tanah yang telah tercemar logam berat lalu dibuat 3 kali ulangan sehingga mendapat 27 satuan percobaan.

3.5.4 Pengairan

Pengairan campuran contoh tanah dan *biochar* dilakukan dengan pembasahan secara kapiler sampai pada kadar air kapasitas lapang untuk setiap satuan percobaan. Air dalam bak penampung setiap waktu dipastikan berada pada kondisi terisi untuk menjaga kelembaban pada contoh percobaan (Gambar 5). Seluruh satuan percobaan dibiarkan dalam kadar air kapasitas lapang selama 4 (empat) pekan sebelum dilakukan sampling.



Gambar 5. Teknik pengairan pot percobaan campuran contoh tanah dan *biochar*.

3.5.5 Percobaan Laboratorium

Setelah diinkubasi selama 4 (empat) pekan, terhadap setiap satuan percobaan mulai dilakukan analisis terhadap beberapa peubah pengamatan baik peubah utama maupun pendukung. Sebagai peubah utama, ditentukan nilai b dan K atau nilai kapasitas dan energi jerap tanah terhadap logam berat Cu dan Zn akibat pengaplikasian *biochar* sekam padi berbagai dosis. Penentuan nilai b dan K diperoleh dengan metode Isotermal Langmuir yang didapat dari hasil pengukuran dengan melibatkan AAS. Terlebih dahulu dibuat stok campuran larutan standar Cu dan Zn dengan konsentrasi 100 ppm sebanyak 1000 mL. Stok dibuat dengan mencampurkan masing-masing 100 mL larutan induk Cu dan Zn 1000 ppm yang kemudian ditera hingga 1000 mL. Larutan tersebut dihomogenkan hingga diperoleh stok campuran larutan standar Cu dan Zn 100 ppm yang siap digunakan.

Dari larutan stok Cu dan Zn 100 ppm tersebut, selanjutnya setiap satuan percobaan dibuat seri bertingkat sebagai konsentrasi awal, yaitu 0, 5, 10, 15, dan 20 ppm (untuk mengetahui kapasitas jerapan maksimum dan energi jerapan tanah terhadap logam berat) dengan panduan pencampuran contoh tanah dengan larutan logam sebagai berikut tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Pencampuran contoh tanah dengan larutan logam.

Berat tanah	Konsentrasi awal	Larutan standar		
	larutan seri Cu dan Zn	Cu dan Zn 100 ppm	Air murni	Total volume
g BKO	ppmmL.....		
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

Campuran tanah dan larutan (Tabel 1) dikocok dengan *end-to-end shaker* selama 2 jam dan didiamkan beberapa saat sebelum fraksi cair dipisahkan dengan bantuan alat laboratorium berupa *centrifuge* atau yang biasa dikenal dengan sentrifugasi untuk memisahkan antara padatan dan cairan dalam suatu larutan. Selanjutnya, konsentrasi logam Cu dan Zn dalam supernatan (M dalam ppm) diukur menggunakan *flame AAS* dan pengukuran tersebut dilanjutkan untuk satuan percobaan lainnya sampai diperoleh total 135 filtrat (karena setiap satuan percobaan dibuat dengan sebanyak 5 konsentrasi seri yang berbeda (0, 5, 10, 15, dan 20 ppm). Dengan demikian, metode spektroskopi serapan atom (AAS) digunakan dalam penelitian ini untuk mengukur proses adsorpsi logam Cu dan Zn yang terjadi (Wijayanti dkk, 2018).

Setelah diperoleh data hasil pengukuran konsentrasi logam Cu dan Zn larut dari setiap satuan percobaan, dilakukan Tahap Pertama berikut untuk memperoleh persamaan Isotermal Langmuir dengan menggunakan aplikasi *Excell*:

1. Dimasukkan nilai setiap satuan percobaan dengan 5 (lima) konsentrasi yaitu 0, 5, 10, 15, dan 20 ppm sebagai nilai M atau nilai konsentrasi kesetimbangan logam berat dalam larutan (mg L^{-1}).
2. Selanjutnya dicari selisih antara konsentrasi logam berat awal Cu dan Zn (0, 5, 10, 15, 20 ppm) dengan nilai konsentrasi logam berat kesetimbangan (M) hingga diperoleh nilai q_1 sebagai nilai total logam berat teradsorpsi (Mg L^{-1}).
3. Nilai total logam teradsorpsi (q_1) dikalikan dengan nilai 10 untuk memperoleh nilai q yang sebenarnya.
4. Langkah terakhir nilai konsentrasi logam berat kesetimbangan (M) dibagi dengan nilai q yang sebenarnya untuk memperoleh nilai y dalam persamaan Isotermal Langmuir ($y = a + zx$).

Berikut disajikan dalam Tabel 2 sebagai tahapan 1 pengolahan data yang dapat digunakan dalam penentuan nilai persamaan Isotermal Langmuir dengan *Excell*:

Tabel 2. Penentuan nilai persamaan Isoterm Langmuir $y = a + zx$.

Konsentrasi awal larutan seri Cu dan Zn	$M = x$ [AAS]	q_1 [C-M]	q [10 x q_1]	$M/q = y$	Isotermal Langmuir ($y = a+zx$)
.....mg L ⁻¹		Mg L ⁻¹	(mg kg ⁻¹)		
0					
5					
10					
15					
20					

Langkah selanjutnya dilakukan Tahap 2, yaitu perhitungan nilai b dan K dengan menggunakan aplikasi Excell seperti pada Tabel 3 dengan langkah-langkah berikut:

1. Setelah setiap satuan percobaan memperoleh persamaan Isotermal Langmuir, digunakan nilai z yang merupakan hasil pembagian dengan nilai b dari persamaan Isotermal Langmuir ($z = 1/b$).
2. *Inverse* nilai z tersebut menghasilkan nilai b sebagai nilai kapasitas adsorpsi maksimum ($b = 1/z$).
3. Untuk memperoleh nilai K sebagai nilai konstansta energi adsorpsi, terlebih dahulu dicari nilai a dengan persamaan ($a = 1/Kb$) sehingga diperoleh nilai K dengan persamaan ($K = 1/ab$).
4. Tahap selanjutnya adalah nilai b dan K dimasukkan ke dalam tabel penyajian data, dapat dilengkapi dengan nilai perbedaan berdasarkan analisis statistika.

Berikut disajikan Tabel 3 sebagai petunjuk untuk memperoleh nilai b dan K dengan menggunakan aplikasi Excell.

Tabel 3. Perhitungan nilai b dan K untuk sejumlah n satuan percobaan.

Satuan percobaan	Isotermal Langmuir (dari Tabel 2)	z [$z = 1/b$]	b [$b = 1/z$]	a [$a = 1/Kb$]	K [$K = 1/ab$]
			mg kg^{-1}		
1					
2					
...					
...					
n					

Pada penentuan atau analisis Cu dan Zn tersedia digunakan pengestrak asam nitrat (HNO_3) 1 N dengan prosedur dihomogenkan antara 10 g contoh tanah (setara kering oven 105°C 24 jam) dengan 20 mL pengestrak HNO_3 1 N menggunakan *shaker* selama 2 jam. Lalu, untuk memperoleh filtrat larutan disaring dengan kertas saring atau menggunakan *centrifuge* dan dilakukan pengukuran Cu dan Zn tersedia menggunakan *flame* AAS. Dari penelitian Salam dkk (2021), dibandingkan pengestrak lainnya seperti CaCl_2 dan NH_4OAc pH 7, pengestrak HNO_3 dan HCl menunjukkan kekuatan relatif DTPA lebih tinggi daripada CaCl_2 dan NH_4OAc dan lebih rendah daripada HNO_3 dan HCl.

Selanjutnya dilakukan penentuan pH tanah menggunakan pengestrak H_2O untuk mengukur pH aktual. Untuk pH aktual dilakukan dengan penimbangan 5 g contoh tanah dan dimasukkan ke botol kocok lalu ditambahkan 10 ml aquades dan dikocok menggunakan *shaker* dengan kecepatan 250 rpm selama 30 menit. Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan pH-meter yang telah dikalibrasi menggunakan larutan buffer pH 4, 7, dan 10 (Kusuma dan Yanti, 2021).

Untuk analisis C-Organik digunakan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sebagai zat pengoksidasi dalam metode *Walkey and Black* berdasarkan jumlah bahan organik yang mudah teroksidasi. Langkah pertama adalah memasukkan 0,5 g contoh tanah kering udara kemudian ditempatkan dalam erlenmeyer 250 ml lalu ditambahkan 5 ml

$K_2Cr_2O_7$ dan dihomogenkan. Selanjutnya, ditambahkan 10 ml H_2SO_4 di ruang asam lalu dihomogenkan dan ditunggu selama 30 menit hingga dingin. Setelah dingin, larutan tersebut diencerkan dengan 100 ml air destilata atau aquades dan ditambahkan 5 ml asam fosfat pekat lalu 2,5 ml larutan NaF 4% dan 5 tetes indikator difenilamin. Larutan dititrasikan dengan larutan $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ atau amonium ferosulfat 0,5 N hingga warna larutan berubah dari cokelat kehijauan menjadi biru keruh dan dicatat banyaknya volume dalam titrasi untuk mengubah warna tersebut lalu dimasukkan pada formula dalam penetapan C-Organik, yaitu $\%C\text{-Organik} = (ml\ K_2Cr_2O_7 \times (1 - V_S/V_B)) / (\text{berat sampel tanah}) \times 0,3886\%$ berat sampel tanah (Lumbanraja, 2022).

Peubah Kapasitas Tukar Kation atau KTK dianalisis dengan pengestrakan 1 N NH_4OAc sebagai larutan ekstraksi untuk menggambarkan kation lain di permukaan tanah sehingga kation yang dapat ditukar dengan ion ammonium di permukaan tanah dapat teridentifikasi dan menggambarkan KTK. Langkah pertama adalah dengan menempatkan 5 g contoh tanah ke dalam botol kocok lalu ditambahkan 50 ml NH_4OAc 1 N pH 7 dan dikocok dengan *shaker* selama 30 menit lalu disentrifusi selama 7 menit. Selanjutnya, filtrat ditampung dan ditambahkan 50 ml NH_4OAc 0,01 N pH 7, dikocok, disentrifusi, dan dibuang filtratnya. Kemudian dilakukan penambahan 50 ml alkohol 96%, dikocok, disentrifusi, dan dibuang filtratnya. Ketika hanya tersisa padatan tanah ditambahkan 50 ml NaCl 10% ke dalam botol kocok lalu dikocok, disentrifusi, dan filtrat ditampung. Selanjutnya, 20 ml filtrat tersebut dipindahkan ke labu destilasi dan ditambahkan 20 ml N NaOH 40% untuk penetapan konsentrasi ammonium dengan cara menghubungkan larutan tersebut dengan peralatan destilasi uap yang ujungnya dimasukkan ke dalam larutan asam borat yang telah diberi indikator campuran bromkesol hijau dan metal merah di bawah pengondensasian. Destilasi dihentikan hingga larutan asam borat dalam erlenmeyer mencapai 40-50 ml dan berwarna hijau untuk selanjutnya dititrasikan dengan HCl 0,1 N. Titrasi dihentikan ketika warna pada titik akhir menjadi merah jambu yang sebelumnya warna hijau. Banyaknya tetesan (ml) HCl yang digunakan pada titrasi tersebut dicatat dan dimasukkan ke dalam formula untuk

penetapan KTK, yaitu dengan formula $KTK = (S \text{ ml} - B \text{ ml}) \text{ HCl titrasi} \times N \text{ HCl} \times \text{ml NaCl} / \text{berat tanah} \times 100 \text{ g} / 100 \text{ g}$ (Lumbanraja, 2023).

Peubah pendukung yang terakhir yaitu penentuan kadar liat tanah. Kadar liat suatu tanah dapat diketahui dengan analisis tekstur tanah. Adapun penetapan tekstur tanah dapat dilakukan dengan tahapan berikut:

- 1) Ditimbang 50 g tanah kemudian dimasukkan ke dalam gelas erlenmeyer 250 ml dan ditambahkan 50 ml larutan calgon.
- 2) Dimasukkan ke dalam gelas pengaduk listrik dan ditambah 400 ml aquades lalu dikocok (*mixer*) selama 5 menit.
- 3) Dipindahkan suspensi ke dalam gelas ukur 1000 ml dan ditambahkan aquades sampai volume mencapai 1000 ml, kemudian diaduk selama 2 menit.
- 4) Suspensi tersebut disimpan selama 24 jam.
- 5) Selanjutnya, bersamaan alat pengaduk diangkat, nyalakan *stopwatch*. Dimasukkan hidrometer setelah 20 detik, setelah 40 detik dibaca angka yang ditunjukkan oleh hidrometer (H_1), kemudian angkat hidrometer dan cuci serta baca suhu suspensi dengan termometer (T_1).
- 6) Biarkan suspensi tersebut selama 1 jam, kemudian dimasukkan kembali hidrometer dan baca sebagai pembacaan kedua (H_2), angkat hidromeyer dan ukur suhu suspensi dengan termometer (T_2).

Selanjutnya dihitung %liat dengan persamaan berikut:

$$\% \text{Debu+liat} = \frac{(H_1 - B) + FK_1}{BKM} \times 100\%$$

$$\% \text{liat} = \frac{(H_2 - B) + FK_2}{BKM} \times 100\%$$

$$\% \text{Debu} = (\% \text{Debu} + \text{liat}) - \% \text{liat}$$

$$\% \text{Pasir} = 100\% - (\% \text{Debu} + \text{liat})$$

$$BKM = \frac{\text{Berat tanah}}{1 + KA}$$

$$FK = 0,36 (T - 20^{\circ}\text{C})$$

Keterangan:

H_1 = Angka hidrometer 40 detik	B = Angka hidrometer blanko (0)
H_2 = Angka hidrometer 60 detik	BKM = Berat Kering Tanah
FK_1 = Faktor koreksi pada suhu T_1	KA = Kadar air tanah
FK_2 = Faktor koreksi pada suhu T_2	$FK = 0,36 (T - 20^{\circ}C)$
T_1 = Suhu suspensi pada selang waktu 40 detik	
T_2 = Suhu suspensi pada selang waktu 60 detik	

3.5.6 Analisis Data

Perbedaan antarperlakuan dianalisis dengan menggunakan metode *Standard Error of The Mean* (SEM). Korelasi data antara peubah utama dan peubah pendukung dilakukan dengan metode *Simple Linear Regression* dan *Multiple Linear Regression* pada taraf 5%.

3.6 Peubah Pengamatan

3.6.1 Peubah Utama

Peubah utama pada penelitian ini adalah Kapasitas Adsorpsi Maksimum (b) dan Konstanta Energi Adsorpsi (K) Cu dan Zn pada tanah tercemar logam berat. Proses adsorpsi logam melibatkan metode Spektroskopi Serapan Atom (SSA) yang hasilnya dianalisis lebih lanjut berdasarkan rumus persamaan Isotermal Langmuir (Wijayanti dkk, 2018).

3.6.2 Peubah Pendukung

Peubah pendukung pada penelitian ini adalah ketersediaan Cu dan Zn tanah, pH tanah, KTK tanah, kandungan C-Organik, dan kadar liat tanah. Ketersediaan Cu dan Zn tanah menggunakan metode pengekstrak HNO_3 . Reaksi (pH) tanah ditetapkan dengan pH-meter menggunakan pelarut H_2O . Penetapan KTK dilakukan dengan larutan NH_4OAc 1 N pH 7. Kandungan bahan organik ditentukan dengan metode *Walkey and Black*. Kadar liat ditentukan dengan metode hidrometer melalui pengendapan yang terjadi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Tanah 26 tahun pascaperlakuan limbah industri memiliki indeks adsorpsi (M/q) logam Cu secara berturut-turut dari yang tertinggi adalah $S_0 > S_2 > S_1$.
2. Tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri tertinggi, yaitu 60 Mg ha^{-1} (S_2) menunjukkan pengaruh yang signifikan secara berturut turut pada pengaplikasian dosis *biochar* sekam padi $B_1 > B_2 > B_0$ dalam meningkatkan indeks adsorpsi (M/q) tanah terhadap logam Cu.
3. Penambahan *biochar* sekam padi dengan dosis 5 Mg ha^{-1} (B_1) berpengaruh nyata dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi maksimum (b) dan menurunkan konstanta energi adsorpsi (K) tanah terhadap logam berat Cu pada tanah dengan riwayat perlakuan limbah industri 15 Mg ha^{-1} (S_1) dan pada tanah tanpa riwayat perlakuan limbah industri (S_0).
4. Hasil penelitian belum sepenuhnya sesuai dengan hipotesis yang telah ditetapkan sebelumnya oleh karena adanya hubungan antara nilai b dan K yang berbanding terbalik atau berkorelasi negatif pada beberapa perlakuan dalam penelitian ini.
5. Kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu (b_{Cu}) dengan analisis uji *Multiple Linear Regression* berbanding lurus korelasinya dengan ketersediaan Cu, C-organik, dan kadar liat tanah, serta berbanding terbalik dengan pH dan KTK tanah.
6. Konstanta energi adsorpsi logam Cu (K_{Cu}) dengan analisis uji *Multiple Linear Regression* berbanding lurus korelasinya dengan Cu tersedia, pH, C-organik, dan KTK tanah, serta berbanding terbalik dengan kadar liat tanah.
7. Adsorpsi logam berat Zn tidak dapat digambarkan dengan baik menggunakan persamaan Isotermal Langmuir.

5.2 Saran

Terdapat beberapa hal yang disarankan untuk penelitian selanjutnya, yaitu dilakukan analisis yang sama dengan penggunaan zeolit atau material lain sebagai alternatif perlakuan baru selain *biochar* dengan dosis yang lebih tinggi serta waktu inkubasi yang lebih lama. Dalam penetapan nilai b dan K , larutan logam Cu dan Zn dilakukan secara terpisah untuk menghindari adanya kompetisi antarlarutan logam. Penelitian nantinya dilakukan analisis kembali dengan menggunakan model persamaan yang lebih relevan untuk Zn, seperti persamaan Isotermal Freundlich atau yang lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanda, D. 2019. Uji Persamaan Isotermal Langmuir dan Freudlich pada Penyerapan Ion Logam Kobalt (II) oleh Kitosan dari Kulit Udang Windu (Penaeus Monodon). *Skripsi*. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry. Banda Aceh.
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., Hullebusch, E. D. V., Amrane, A., dan Rtimi, S. 2021. Mechanisms and Adsorption Capacities of *Biochar* for the Removal Organik and Inorganic Pollutants From Industrial Wasteater. No. *Journal Of Environmental Science and Technology*. 18: 3273-3294.
- Anggriani, U. M., Hasan, A., dan Purnamasari, I. 2021. Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif dalam Penurunan Konsentrasi Logam Tembaga (Cu) dan Timbal (Pb). *Jurnal Kinetika*. 12 (2): 29-37.
- Anzori, I., Pringgenies, D., dan Redjeki, S. 2019. Pengaruh Kenaikan pH terhadap Kandungan Logam Berat Cu dan Cd Serta Struktur Insang dan Mantel Kerang Anadara Granosa dengan Studi Scanning Electron Microscopy (Sem). *Journal Moluska No. 3* (1): 23-27.
- Arifin, Z., Ma'shum, M., Susilowati, L. E., dan Bustan. 2022. Aplikasi *Biochar* dalam Mempengaruhi Aktivitas Mikrobial Tanah pada Pertanaman Jagung yang Menerapkan Pola Pemupukan Terpadu. *Jurnal Prosiding Saintek*. 4 (1): 207-217.
- Arifin, M., Putri, M. D., Sandrawati, A., dan Harryanto, R. 2018. Pengaruh Posisi Lereng terhadap Sifat Fisika dan Kimia Tanah pada Inceptisols di Jatinangor. *Solirens*. 16 (2): 37-44.
- Asria, M. dan Alhamid, F. 2021. Analisis Kandungan Logam Berat Cu dan Zn dalam Air Limbah Industri. *Journal of Research on Chemistry and Engineering*. 2 (1): 29-31.
- Astanda, Y., Chairul., dan Yenti, S. R. 2016. Keseimbangan Adsorpsi Logam Cu Menggunakan Karbon Aktif dari Ampas Tebu sebagai Adsorben. *Jom F teknik*. 3 (2): 1-9.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Stasiun Klimatologi Lampung. 2024. *Buletin Mei 2024*. Bandar Lampung.

- Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian. 2012. *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk Edisi 2*. Balai Penelitian Tanah. Bogor.
- Bachtiar, T., Nurrobifahmi, C. A., dan Flatian, N. A. 2019. Teknik Isotop ^{15}N untuk Mengevaluasi pengaruh *Biochar* dan Bakteri Penambat Nitrogen terhadap Serapan Nitrogen Tanaman Padi Sawah. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 43 (2): 139-145.
- Cendekia, D. dan Afifah, D. A. 2023. Model Isoterm Adsorpsi Langmuir pada Analisis Daya Serap Iodium. *Journal Applied of Science and Chemical Engineering*. 1 (2): 38-43.
- Dani, K. R. 2023. Perubahan Ketersediaan dan Serapan Cu–Zn oleh Rumput Gajah (*Pennisetum Purpureum*) pada Tanah Tercemar Logam Berat dengan Perlakuan Berbagai Jenis *Biochar*. *Skripsi*. Fakultas Pertanian. Universitas Lampung.
- Fajri, S. M., Sasmita, A., dan Elystia, A S. 2021. Pengaruh Varian Dosis Penambahan *Biochar* Sekam Padi terhadap Efisiensi Penyisihan Logam Berat Cd pada Tanah Tercemar Logam Berat. *Jom Fteknik*. 8 (1): 1-6.
- Fuertes, A. B., Arbestain, M. C., dan Sevilla, M. 2010. Chemical and Structural Properties of Carbonaceous Products Obtained by Pyrolysis and Hydrothermal Carbonization of Corn Stover. *Soil Res*. 48 (1): 618-626.
- Ginanjari, K. 2009. Fraksi Labil Tembaga dan Seng dalam Tanah pada 10 Tahun Setelah Perlakuan dengan Limbah Industri. *Skripsi*. Fakultas Pertanian. Universitas Lampung.
- Haefele, S. M., Konboon, Y., Wongboon, W., Amarante, S., Maarifat, A. A., Pfeiffer, E. M., dan Knoblauch, C. Effects and Fate of *Biochar* From Rice Residues in Rice-Based Systems. *Field Crops Research*. 121 (1): 430-440.
- Hafiyah, S. 2013. Kinetika Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B Menggunakan Karbon Aktif Sekam Padi (*Oryza Sativa L.*). *Skripsi*. Universitas Islam Alauddin Makassar. Makassar.
- 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*. Hal 130-136.
- Hariyono, B. 2021. Multifungsi *Biochar* dalam Budidaya Tebu. *Buletin Tanaman Tembakau, Serat, dan Minyak Industri*. 13 (2): 94-112.
- Hair, J. R., Joseph, F., et. al. 2011. *Multivariate Data Analysis*. Fifth Edition. Prenticehall, Inc. New Jersey. Hlm:730.

- Hasan, V. S. 2023. Perubahan Ketersediaan Cu, Zn, dan No., Pada Tanah 25 Tahun Pascaperlakuan Limbah Industri dengan Pemberian Biochar Sekam Padi. *Skripsi*. Fakultas Pertanian. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Hatika, R. G. 2022. Kandungan Logam Berat dalam Tanah pada Daerah Sekitar Penambangan Emas di Sungai Kuantan. *Jurnal Sainsmat*. 11 (1): 95-103.
- Hidayat, B. 2015. Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat Menggunakan *Biochar*. *Jurnal Pertanian Tropik*. 2 (1): 51-61.
- Ibrahim, M., Khan, S., Hao, X., and Li, G. 2016. Biochar Effect on Metal Bioaccumulation and Arsenic Speciation in Alfalfa (*Medicago Sativa L.*) Grown in Contaminated Soil. *Journal Environmental Science Technology*. 13: 2467-2474.
- Irianti, T. T., Kuswandi., Nuranto, S., dan Budiyatni, A. 2017. *Logam Berat dan Kesehatan*. Universitas Gadjah Mada. No.
- Karamina, H., Siswanto, B., dan Maringan, V. H. 2022. Pengaruh Dosis *Biochar* Sekam Padi terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Tomat (*Solanum Lycopersicum L.*) pada Alfisol. *Jurnal Ilmiah Hijau Cendekia*. 7 (2): 60-70.
- Karbassi, A. R., Monavari, S. M., Nabi, B, G. R., Nouri, J., dan Nematpour, K. 2018. Metal Pollution Assessment of Sediment and Water in the Shur River. *Environ Monitor Assess*. 147(1-3): 107-116.
- Khan, M. Z. H., Hasan, M. R., Khan, M., Aktar, S., dan Fatema, K. 2018. Distribution of Heavy Metals in Surface Sediments of the Bay of Bengal Cost. *Journal of Toxicologi*. 2 (1): 1-7.
- 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.
- Kumar, S., Sangwan, P., Dhankhar, R. M. V., dan Bidra, S. 2013. Utilization of Rice Husk and Their Ash. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*. 1 (5): 126-129.
- 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.
- Lebrun, M., Miard, F., Nandillon, R. L., Eger, J. C., Hambli, H. N., Scippa, G. S., Bourgerie, S., dan Morabito, D. 2018. Replaced Phitostabilization of Multicontaminated Mining Technosols Using *Biochar* Amandements: Early Stage Evaluation of *Biochar* Feedstock And The Effect of Particle

- Size on As and Pb Accumulation of Two Salicaciae Spesies. *Journal Chemosphere*. 194 (1): 316-326.
- Li, S., Yiming, X., Jiang, S., Yang, M., Lei, H., Cui, W., dan Wang, F. 2023. *Biochar Decreases Cr Toxicity and Accumulation in Sunflower Grown in Cr (VI)-Polluted Soil*. *Toxics*. 11. 787.
- Lumbanraja, J. 2022. *Penuntun Praktikum Dasar-Dasar Ilmu Tanah*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Lumbanraja, J. 2023. *Penuntun Praktikum Kimia Tanah*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Maulina, S., dan M.Iriansyah. 2018. Characteristics of Activated Carbon Resulted from Pyrolysis of the Oil Palm Fronds Powder. *In IOP Conference Series: Material Science and Engineering*. 309: 12-72
- Meisandi, A. A. 2023. Pertumbuhan dan Serapan Cu Dan Zn Bayam Duri pada Tanah Tercemar Logam Berat diperlakukan Biochar dengan Berbagai Kehalusan. *Skripsi*. Fakultas Pertanian. Universitas Lampung.
- Miri, N. S. S. Dan Narimo. 2022. Kajian Persamaan Isothermal Langmuir dan Freundlich pada Adsorpsi Logam Berat Fe (II) dengan Zeolit dan Karbon Aktif dari Biomassa. *Jurnal Kimia dan Rekayasa*. 2 (2): 58-71.
- Muna, A. N. 2011. Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif dari Batang Pisang sebagai Adsorben. *Skripsi*. Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Nurida, N., Rachman, A., Sutono, S. 2017. *Biochar Pembenh Tanah yang Potensial*. IAARD Press. Bogor.
- Nix, R. 2024. Chemistry LibreTexts. Queen Mary University of London. London.
- 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.
- Pujiati, S. A. S., Sukarjo., Susatyo, E. B., dan Widiarti, N. 2018. Adsorpsi Tanah terhadap Ion Logam No. (Ii) dan Zn (Ii) serta Remediasinya dengan Metode Pencucian. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 7 (2): 187-194.
- Ross, S.M. 1994. Sources and Forms of Potentially Toxic Metals In Soil-Plant Systems. Pp. 3- 25. In S.M. Ross (Ed.). *Toxic Metals In Soil-Plant Systems*. John Wiley and Sons, Ltd., New York.

- Salam, A. K., Djuniwati, S., Sarno., dan Harahap, J. T. 1997. Kapur dan Kompos Daun Singkong Meningkatkan Kelarutan Tembaga dan Seng Asal Limbah Industri di Tanah Andisol dari Gisting Lampung. *Jurnal Tanah Tropika*. 4:123-131.
- Salam, A. K., Djuniwati, S., Sarno., dan Novpriansyah, H. 1998. Perubahan Kelarutan Seng Asal Limbah Industri di dalam Tanah Tropika akibat Penambahan Kapur dan Kompos Daun Singkong. *Jurnal Tanah Tropika*. 6: 111-117.
- Salam, A. K. 2017. *Management of Heavy Metals in Tropical Soil Environment*. Global Madani Press. Bandar Lampung.
- Salam, A. K. dan Ginanjar, K. 2018. Tropical Soil Labile Fractions of Copper in the Experimental Plots ±Ten Years After Application of Copper-Containing-Waste. *Journal Tropical Soils*. 23 (1): 11-18.
- Salam, A. K. 2020. *Ilmu Tanah*. Global Madani Press. Bandar Lampung.
- Salam, A. K., Pakpahan, A. F., Sriyani, G. S. N., Sarno., Novpriansyah, H., Yusnaini, S., and Dermiyati. 2021. The Residual Copper and Zinc in Tropical Soil over 21 Years after Amandement with Heavy Metal Containing Waste, Lime, and Compost. *Research Article: Applied and Environmental Soil Science*. 14.
- Salam, A. K., Milanti, M., Silva, G., Rachman, F., Santa, I., Rizki, D., And Sarno. 2021. The Use of $N HNO_3$ to Determine Copper and Zinc Levels in Heavy-Metal Polluted Tropical Soils. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/905/1/012001>.
- Salam, A. K., Novpriansyah, H., dan Bucharie, H. 2022. Metal Extractability Changes in Soils Under Thorny Amaranth. *Journal of Soil Science and Agroclimatology*. 19 (2): 211-220.
- Salam, A. K. 2023. *Pengantar Ilmu Kimia Tanah*. Global Madani Press. Bandar Lampung.
- Sasmita, A., Elystia, S., dan Fajri, S. M. 2021. Penyisihan Logam Berat Pb pada Tanah dengan Penambahan Biochar Sekam Padi. *Jurnal Riset Teknologi Industri*. 15 (2): 268-278.
- Setyowati, J. 2018. Kinetika Adsorpsi Ion Logam Cu, Cd, dan Mn dalam Air Limbah menggunakan Adsorben Serbuk Gergaji Kayu Meranti. *Skripsi*. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah. No.

- Shi-Xiang, Z., T. Na, X.D. Wang. 2017. Effect of Temperature on the Structural and Physicochemical Properties of Biochar with Apple Tree Branches as Feedstock Material. *Energies*. 10 (9): 1293.
- Siaka, I. M., Sahara, E., dan Dharmayoga, I. G. A. M. 2015. Bioavailabilitas dan Spesiasi Logam Berat Pb dan Cd pada Tanah Pertanian Basah dan Kering di Daerah Denpasar. *Jurnal Kimia*. 9 (1): 132-138.
- Silva, G., Salam, A. K., Aini, N. S., dan Buchari, H. 2021. Phytoextraction Copper from the Tropical Realm 21 Years After Amandement with Waste Containing Heavy Metals. *Journal of Tropical Soils*. 26 (1): 11-18.
- Subarkhah, M. J. dan Titah, H. S. 2023. Remediasi Logam Berat Pb dengan menggunakan Biochar Sekam Padi dan Tongkol Jagung. *Jurnal Sains dan Seni ITS*. 12 (1): 48-53.
- Subki, N., dan R. Hasyim. 2012. Rice Husk as Biosorbent: A Review. *Health and the Environment Journal*. 3: 89–95.
- Suryanto, P., Aryono, W. B., dan Sabarnurdin, M. S. 2006. Model Bera dalam Sistem Agroforestri. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 12 (2): 15-26.
- Susantoro, T. M., dan Andayani, A. 2019. Kontaminasi Logam Berat di Kawasan Pesisir Tanjung Selor No. Utara. *Oseanologi dan Limnologi di No*. 4 (1): 1-14.
- Tambunan, S., Siswanto, B., dan Handayanto, E. 2014. Pengaruh Aplikasi Bahan Organik Segar dan *Biochar* terhadap Ketersediaan P dalam Tanah di Lahan Kering Malang Selatan. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 1 (1): 85-92.
- 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.
- Utomo, M.,Sudarsono., Rusman, B., Sabrina, T., Lumbanraja, J., dan Wawan. 2016. *Ilmu Tanah: Dasar-Dasar dan Pengelolaan*. Prenadamedia Group. No.
- Widowati, W., Sastiono, A., dan Jusuf, R.. 2008. *Efek Toksik Logam*. Penerbit Andi. No.
- 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.

- Wirakrama, D. M. 2023. Perubahan Ketersediaan dan Serapan Cu-Zn serta Pertumbuhan Bayam Duri pada Tanah Tercemar Logam Berat akibat Perlakuan Berbagai Jenis Biochar. *Skripsi*. Fakultas Pertanian. Universitas Lampung.
- Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., dan Yargicoglu, E. 2015. Characteristics and Application Of *Biochar* for Environmental Remediation. *Journal Environmental*. 45 (9): 939-969.
- Yusran, F. H. 2010. Jerapan Isotermik Fosfor pada Tanah-Tanah Penting di No. Selatan. *Jurnal Chlorophyl*. 6 (1): 14-17.
- 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.