

**PENGARUH AMELIORAN DAN PEMUPUKAN N, P, DAN K TERHADAP
KETERSEDIAAN UNSUR HARA MIKRO Cu DAN Zn DI DALAM
TANAH PADA LAHAN PERTANAMAN JAGUNG MANIS**

(Skripsi)

Oleh

**M. Royhan Zaqi
2254181001**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**PENGARUH AMELIORAN DAN PEMUPUKAN N, P, DAN KTERHADAP
KETERSEDIAAN UNSUR HARA MIKRO Cu DAN Zn DI DALAM
TANAH PADA LAHAN PERTANAMAN JAGUNG MANIS**

Oleh

**M. Royhan Zaqi
2254181001**

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH AMELIORAN DAN PEMUPUKAN N, P, DAN K TERHADAP KETERSEDIAAN UNSUR HARA MIKRO Cu DAN Zn DI DALAM TANAH PADA LAHAN PERTANAMAN JAGUNG MANIS

Oleh

M. ROYHAN ZAQI

Unsur hara mikro Cu dan Zn berperan penting dalam metabolisme tanaman meskipun dibutuhkan dalam jumlah kecil. Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh kombinasi amelioran (biochar sekam padi+pupuk kandang sapi dan pupuk kandang sapi+*bio-slurry*) serta pemupukan N, P, K terhadap ketersediaan Cu dan Zn di tanah pada pertanaman jagung manis. Penelitian dilaksanakan di Balai Pelatihan Pertanian Lampung (September-Desember 2024) dengan Rancangan Acak Kelompok faktorial. Faktor pertama adalah amelioran: tanpa amelioran (B₀), biochar sekam padi + pupuk kandang sapi (B₁), dan pupuk kandang sapi + *bio-slurry* (B₂). Faktor kedua adalah dosis pupuk N, P, K: tanpa pupuk (P₀), ½ dosis rekomendasi (P₁), 1 dosis rekomendasi (P₂), dan dosis tepat (P₃). Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi amelioran, pemupukan N, P, K maupun interaksinya tidak berpengaruh nyata terhadap ketersediaan Cu dan Zn tanah. Namun, kombinasi biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi meningkatkan C-organik dan P-tersedia. Pemupukan N, P, K dosis tepat menghasilkan P-tersedia tertinggi. Interaksi amelioran dengan pemupukan N, P, K berpengaruh nyata terhadap pH tanah, dengan pH tanah tertinggi pada perlakuan pemupukan N, P, K satu dosis rekomendasi dengan kombinasi pupuk kandang sapi dan *bio-slurry*. Ketersediaan Cu dipengaruhi secara sangat nyata oleh interaksi C-organik dan pH tanah ($R^2 = 0,73$), namun ketersediaan Zn tidak dipengaruhi oleh pH, C-organik dan P-tersedia maupun interaksinya.

Kata Kunci: Cu-tersedia, Zn-tersedia, biochar sekam padi, pupuk kandang sapi, *bio-slurry*, pupuk N, P, K.

ABSTRACT

THE EFFECTS OF AMELIORANTS AND N, P, AND K FERTILIZATION ON THE AVAILABILITY OF MICRONUTRIENTS Cu AND Zn IN SOIL ON SWEET CORN PLANTATION

By

M. ROYHAN ZAQI

Copper and zinc play important roles in plant metabolism despite being required in small amounts. This study aims to examine the effects of combinations of ameliorants (rice husk biochar+cow manure and cow manure+*bio-slurry*) and N, P, K fertilization on Cu and Zn availability in soil on sweet corn plantation. The study was conducted at the Lampung Agricultural Training Center (September-December 2024) using a factorial Randomized Block Design. The first factor was ameliorants: no ameliorant (B₀), rice husk biochar + cow manure (B₁), and cow manure + *bio-slurry* (B₂). The second factor was N, P, K fertilizer doses: no fertilizer (P₀), ½ recommended dose (P₁), 1 recommended dose (P₂), and precise dose (P₃). Results showed that ameliorants, N, P, K fertilization and their interactions had no significant effect on Cu and Zn availability in soil. However, the combination of rice husk biochar and cow manure significantly increased organic-C and available-P. Precision fertilization resulted in the highest available-P. The interaction between ameliorants and N, P, and K fertilization significantly affected soil pH, with the highest soil pH obtained in the treatment of N, P, and K fertilization at one recommended dose combined with cow manure and *bio-slurry*. Cu availability was significantly influenced by the interaction of C-organic and soil pH ($R^2 = 0.73$), but the availability of Zn was not effected by pH, organic-C, available-P and their interactions.

Keywords: available-Cu, available-Zn, rice husk biochar, cow manure,
bio-slurry, N, P, K fertilizers.

Judul Skripsi : PENGARUH AMELIORAN DAN PEMUPUKAN N, P, DAN K TERHADAP KETERSEDIAAN UNSUR HARA MIKRO Cu DAN Zn DI DALAM TANAH PADA LAHAN PERTANAMAN JAGUNG MANIS

Nama : M. Royhan Zaqi

NPM : 2254181001

Jurusan : Ilmu Tanah

Fakultas : Pertanian



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing pertama

Dr. Supriatin, S.P., M.Sc.
NIP 197912192005012001

Pembimbing kedua

Septi Nurul Aini, S.P., M.Si.
NIP 199202022019032021

2. Ketua Jurusan Ilmu Tanah

Ir. Hery Novpriansyah, M.Si.
NIP 1966111519901010001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

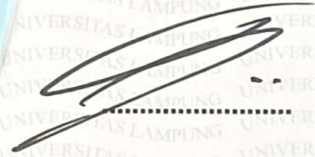
Ketua : Dr. Supriatin, S.P., M. Sc.



Sekretaris : Septi Nurul Aini, S.P., M. Si.



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



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.
NIP 196411181989021002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 02 April 2026

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini, menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“Pengaruh Amelioran dan Pemupukan N, P, dan K terhadap Ketersediaan Unsur Hara Mikro Cu dan Zn di dalam Tanah pada Lahan Pertanaman Jagung Manis”** merupakan hasil karya saya sendiri bukan hasil karya orang lain. Penelitian ini merupakan bagian dari *project* yang dilaksanakan saat mengikuti program magang MBKM di Balai Pelatihan Pertanian Lampung dengan sumber dana program MBKM Universitas Lampung 2024. Dosen-dosen yang terlibat dalam penelitian ini adalah Dedy Prasetyo, S.P., M.Si. ; Dr. Supriatin, S.P., M.Sc. ; Nur Afni Afrianti, S.P., M.Sc. ; Septi Nurul Aini, S.P., M.Si. ; Liska Mutiara Septiana, S.P., M.Si. dan Winih Sekaringtyas Ramadhani, S.P., M.P.

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

Bandar Lampung, 02 April 2026

Penulis,



M. Royhan Zaqi
NPM 2254181001

RIWAYAT HIDUP



M. Royhan Zaqi adalah nama penulis Skripsi ini. Penulis dilahirkan di Way kanan pada tanggal 08 November 2004 sebagai anak keempat dari 4 bersaudara dari pasangan Bapak Edy dan Ibu Daina. Penulis mulai menempuh pendidikan formal di MIN 1 Way Kanan pada tahun 2012-2017, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Blambangan Umpu pada tahun 2017-2019, dan selanjutnya melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Blambangan Umpu pada tahun 2019-2022.

Penulis diterima sebagai mahasiswa baru dan terdaftar di Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung pada tahun 2022 melalui jalur masuk Seleksi Mandiri Masuk Perguruan Tinggi Negeri Wilayah Barat (SMMPTN-Barat). Pada bulan Agustus-Desember 2024 penulis melaksanakan Magang pada Program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di Balai Pelatihan Pertanian (Bapeltan) Lampung. Kemudian pada bulan Januari-Februari 2025 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kampung Sri Busono, Kecamatan Way Seputih, Kabupaten Lampung Tengah.

MOTTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(QS. AL-Baqarah : 286)

“Pada Akhirnya, Semua Hanya Permulaan”

(Nadin Amizah)

“In The End, I’m Gonna Be Alright”

(LANY)

“it's fine to fake it till you make it, until you do, until it's true”

(Taylor Swift)

SANWACANA

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Pengaruh Amelioran dan Pemupukan N, P, dan K terhadap Ketersediaan Unsur Hara Mikro Cu dan Zn di dalam Tanah pada Lahan Pertanaman Jagung Manis”** sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Pertanian. Sholawat serta salam penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW, yang senantiasa kita harapkan syafaat beliau di hari kiamat kelak. Penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik berkat bimbingan dan pengarahan dari dosen pembimbing, serta dukungan materil maupun moril dari keluarga dan kerabat. Sehubungan dengan hal tersebut, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, antara lain :

1. Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya yang sangat berlimpah tak terhingga, serta Nabi Muhammad SAW sebagai panutan dan inspirasi dalam menjalani kehidupan.
2. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
3. Ir. Hery Novpriansyah, M.Si., selaku Ketua Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung
4. Ibu Dr. Supriatin, S.P., M.Sc. selaku dosen pembimbing utama yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk memberikan bimbingan, bantuan, memotivasi sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan skripsi ini.
5. Ibu Septi Nurul Aini, S.P., M.Si. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan arahan, motivasi, kritik dan saran yang membangun semangat sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan skripsi ini.

6. Ibu Nur Afni Afrianti, S.P., M.Sc. selaku dosen pembahas yang dengan penuh ketelitian telah memberikan koreksi, arahan, serta saran yang membuka wawasan penulis sehingga skripsi ini dapat tersusun dengan lebih baik dan terarah.
7. Bapak, Ibu dosen dan Staf Fakultas Pertanian terutama Jurusan Ilmu Tanah yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
8. Kedua orang tua terkasih, Bapak Edy dan Ibu Daina yang telah mengasih, mendidik, dan membimbing penulis dengan penuh kesabaran dan keikhlasan. Terima kasih atas setiap pengorbanan, do'a yang tidak pernah putus, dan dukungan yang menjadi kekuatan terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan studi. Kalian berdua adalah guru kehidupan terbaik yang telah menanamkan nilai-nilai mulia dan memberikan bekal yang sangat berharga untuk masa depan penulis. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan keberkahan, kesehatan, dan membalas seluruh kebaikan Bapak dan Ibu dengan surga-Nya yang penuh kenikmatan.
9. Ketiga kakak penulis, Ferdy, Marwantyo, dan Dela, yang telah memberikan dukungan penuh baik materil maupun moril. Terutama kepada Yunda yang telah menjadi tempat berkeluh kesah, memberikan arahan dan motivasi selama penulis menyelesaikan penulisan skripsi. Terima kasih atas segala bantuan, do'a, dan semangat yang diberikan. Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian dengan pahala yang berlimpah.
10. Teman-teman “Intel Tanah” Syafa, Kamil, Nabil, Dinda, Laila dan Gita yang telah memberikan semangat dan memotivasi penulis untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini.
11. Teman-teman “Iltan Soft Boys” Wahyu, Kamil, Rizky, Rama, dan Faizun yang telah memberikan semangat dan memotivasi penulis untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini.
12. Teman seperjuangan penelitian di lapang (Tim MBKM), yang telah bekerja sama dalam penelitian dan selalu kompak sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan skripsi ini.

13. Teman seperjuangan penelitian (YKKA), Nur Hidayah, Fesya, Kamil dan Ridho yang telah bekerja sama dalam penelitian dan selalu kompak sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan skripsi ini.
14. Kepada teman-teman saya yang tak kalah penting kehadirannya, Rayhan, Fabil, Chazbi, Rahmad, Dego, Ghufron, Exa, Danti, Rizka, Deffa, Nagita, Ardina, Baidah, Zelin, dan Bella. Terima kasih karena telah hadir menjadi bagian dari perjalanan hidup penulis, yang telah berkontribusi banyak dari awal hingga akhir penulisan, memberikan semangat, mendukung, dan menghibur.
15. Teman-teman seperjuangan Jurusan Ilmu Tanah angkatan 2022 dan semua pihak yang terlibat dalam penulisan skripsi ini dan tidak bisa disebutkan satu persatu.
16. Temanku semasa SMA, terima kasih sudah mau mendengarkan keluh kesahku yang itu-itu saja. Mari kita selesaikan apa yang sudah kita mulai. Satu langkah lagi menuju sarjana, kawan.

Akhir kata, penulis berdoa semoga semua kebaikan pihak yang terlibat dalam penulisan skripsi ini menjadi amal ibadah. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan senang hati menerima kritik, saran dan masukan yang sifatnya membangun. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri maupun pembaca. Terima kasih.

Bandar Lampung, 02 April 2026
Penulis,



M. Royhan Zaqi

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan	5
1.4. Kerangka Pemikiran.....	5
1.5. Hipotesis	10
II. TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1. Pentingnya Unsur Hara Mikro Cu dan Zn Bagi Tanaman	11
2.2 Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah	12
2.3 Pengaruh Amelioran dan Pemupukan N, P, dan K terhadap Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah	14
2.4 Pengaruh pH, C-organik dan P-tersedia terhadap Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah.	17
III. METODE PENELITIAN	19
3.1 Waktu dan Tempat.....	19
3.2 Alat dan Bahan	19
3.3 Metode	19
3.4 Pelaksanaan Penelitian.....	21
3.4.1 Penyiapan Lahan.....	21

3.4.2 Aplikasi Amelioran	21
3.4.3 Penanaman	22
3.4.4 Pemupukan.....	22
3.4.5 Pemeliharaan Tanaman	23
3.4.6 Pengambilan Sampel Tanah	24
3.5 Variabel Pengamatan.....	24
3.5.1. Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah	24
3.5.2 Variabel Pendukung	25
3.6 Analisis Data.....	25
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Hasil Analisis Ragam variabel utama dan variabel pendukung.....	26
4.2 Ketersediaan Cu di dalam tanah.....	27
4.3 Ketersediaan Zn di dalam tanah.....	29
4.4 Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap sifat kimia tanah (pH, C-organik, dan P-tersedia)	30
4.4.1 pH tanah.....	30
4.4.2 C-organik	32
4.4.3 P-tersedia.....	33
4.5 Hubungan Cu dan Zn tersedia dengan sifat tanah.....	35
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	38
5.1 Simpulan	38
5.2 Saran	38
DAFTAR PUSTAKA.....	39
LAMPIRAN.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Dosis Pemupukan dan Jenis Pupuk.....	23
2. Hasil Analisis Ragam variabel utama dan pendukung.....	26
3. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah. Data dalam kurung adalah data tranformasi $\sqrt{\quad}$	28
4. Pengaruh interaksi bahan amelioran dengan pemupukan N, P, dan K terhadap pH tanah.	30
5. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap C-organik dan P-tersedia di dalam tanah. Data dalam kurung adalah data tranformasi $\sqrt{\quad}$	32
6. Hubungan sifat tanah dengan ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah.	35
7. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan Cu di dalam tanah.	47
8. Uji homogenitas ketersediaan Cu di dalam tanah.	47
9. Analisis ragam ketersediaan Cu di dalam tanah.....	48
10. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan Zn di dalam tanah.....	48
11. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan Zn di dalam tanah. Data transformasi $\sqrt{\quad}$	49
12. Uji homogenitas ketersediaan Zn di dalam tanah. Data transformasi $\sqrt{\quad}$	49
13. Analisis ragam ketersediaan Zn di dalam tanah. Data transformasi $\sqrt{\quad}$	50

14. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap pH tanah.	50
15. Uji homogenitas pH tanah.	51
16. Analisis ragam pH tanah.	51
17. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap C-organik. Data dalam kurung adalah data transformasi $\sqrt{\quad}$	52
18. Uji homogenitas C-organik. Data transformasi $\sqrt{\quad}$	52
19. Analisis ragam C-organik. Data transformasi $\sqrt{\quad}$	53
20. Pengaruh bahan amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap P-tersedia.	53
21. Uji homogenitas P-tersedia.	54
22. Analisis ragam P-tersedia.	54
23. Analisis Tanah Awal.	54
24. Kriteria penilaian sifat kimia tanah.	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran pengaruh amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah pada lahan pertanaman jagung manis.....	10
2. Tata Letak Petak Percobaan dan Perlakuan di Lapang.....	21
3. Kondisi Lahan Penelitian.....	59
4. Olah Tanah dengan Bajak Rotari.....	59
5. Petak Percobaan.....	59
6. Aplikasi Biochar dan Pupuk Kandang.....	59
7. Aplikasi <i>Bio-slurry</i>	59
8. Penanaman.....	59

I. PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Ketersediaan unsur hara atau fitonutrien menjadi kunci utama dalam mendukung pertumbuhan, perkembangan, dan produktivitas tanaman secara optimal.

Berdasarkan jumlah yang dibutuhkan oleh tanaman, unsur hara dibagi menjadi dua kelompok, yaitu unsur hara makro (C, H, O, N, P, K, Ca, S, Mg) dan unsur hara mikro (Cu, Zn, Mn, Fe, Mo, B, Cl). Meskipun unsur hara mikro dibutuhkan dalam jumlah kecil, namun berperan penting dalam metabolisme tanaman seperti Cu yang berfungsi sebagai penyusun enzim, pembentukan klorofil, serta metabolisme karbohidrat dan protein (Hardjowigeno, 2003). Sementara itu, Zn merupakan unsur hara yang berperan dalam metabolisme asam nukleat, pembelahan sel, dan sintesis protein, serta dapat meningkatkan kesehatan dan hasil tanaman serta meningkatkan ketahanan terhadap serangan hama (Saleem dkk., 2022). Kekurangan unsur hara mikro akan menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta menurunkan produktivitas lahan pertanian secara keseluruhan karena terhambatnya proses metabolisme tanaman yang berdampak pada penurunan hasil panen per satuan luas, sementara kelebihan konsentrasi unsur tersebut dapat bersifat toksik bagi tanaman (Alloway, 2008).

Tanah masam di daerah tropis yang berkembang dari batuan vulkanik asam dan batuan sedimen memiliki kandungan Cu dan Zn tersedia yang bervariasi (Supriatin dan Salam, 2024). Studi terdahulu pada tanah Ultisol Lampung menunjukkan kandungan awal Cu tersedia sebesar 0,37-0,44 mg kg⁻¹ dan Zn tersedia sebesar 2,17-2,35 mg kg⁻¹, yang keduanya berada di atas batas kritis dan tergolong cukup untuk kebutuhan tanaman (Lestari, 2023; Afrilia, 2024; Dobermann dan Fairhurst, 2000). Namun demikian, permasalahan defisiensi hara mikro masih ditemukan pada cakupan wilayah yang lebih luas. Supriatin dan

Salam (2024) mengungkapkan bahwa dari 16 sampel tanah masam tropis Lampung, sekitar 12,5% sampel mengalami defisiensi Cu dan 56% mengalami defisiensi Zn akibat proses eluviasi intensif.

Pada lahan kering masam, Cu dan Zn memiliki kelarutan yang tinggi sehingga rentan hilang melalui pencucian, terutama pada tanah dengan kapasitas tukar kation (KTK) dan kandungan bahan organik rendah. Pengaplikasian bahan amelioran seperti biochar dan pupuk kandang sapi mampu meningkatkan KTK tanah sehingga dapat menahan Cu dan Zn, serta menyediakan situs pertukaran yang dapat mempertahankan kedua unsur tersebut dalam bentuk yang dapat diserap tanaman. Sementara itu, *bio-slurry* yang diaplikasikan secara *foliar* ke tanaman tetap digunakan sebagai perlakuan, namun karena diaplikasikan langsung pada tanaman maka kontribusinya terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah bersifat tidak langsung dibandingkan dengan biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi. Mengacu pada kondisi tersebut, penambahan bahan amelioran seperti biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi yang diaplikasikan langsung ke dalam tanah, terutama ketika dikombinasikan dengan pemupukan N, P, dan K, lebih berpotensi mempengaruhi ketersediaan Cu dan Zn pada lahan kering masam.

Biochar memiliki karakteristik khusus dengan kandungan karbon tinggi dan stabil, serta memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga efektif dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Sohi dkk, 2010). Meskipun akibat aplikasi biochar dapat menurunkan kelarutan Zn, namun peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) dan kompleks pertukaran dari biochar dapat membantu mempertahankan Zn dalam bentuk yang dapat dipertukarkan. Penelitian Lestari (2023) menunjukkan bahwa aplikasi biochar pada tanah Ultisol menurunkan ketersediaan Zn secara nyata, sementara ketersediaan Cu tidak terpengaruh nyata. Penurunan Zn ini disebabkan oleh kemampuan biochar membentuk kompleks organik dengan ion logam Zn melalui gugus fungsional yang mengurangi mobilitas Zn dalam larutan tanah (Komárek dkk., 2013). Di sisi lain, stabilitas Cu yang lebih tinggi dalam tanah masam dan afinitasnya yang rendah terhadap bahan organik biochar membuat Cu kurang terpengaruh (Hodges, 2011).

Selain biochar, penambahan pupuk kandang sapi sebagai amelioran dapat meningkatkan KTK tanah, menekan kehilangan hara, serta menyediakan unsur hara makro dan mikro bagi tanaman (Adugna, 2016). Berdasarkan penelitian Afrilia (2024), aplikasi pupuk kandang sapi meningkatkan ketersediaan Zn di tanah Ultisol melalui suplai langsung unsur Zn dari kandungan alami pupuk (315 ppm). Pupuk kandang sapi juga mengandung Cu (3–15 ppm) yang dapat meningkatkan ketersediaan Cu melalui pelepasan ion Cu^{2+} selama dekomposisi (Chaudhary dan Narwal, 2005). Namun, peningkatan C-organik tanah akibat pupuk kandang sapi berpotensi mengurangi ketersediaan Cu dan Zn. Hal ini disebabkan karena bahan organik memiliki permukaan bermuatan negatif, sehingga mampu menjerap unsur hara Cu dan Zn melalui pembentukan ikatan khelat (Afrilia, 2024; Alloway, 2008).

Sementara itu, *bio-slurry* cair sebagai pupuk organik hasil fermentasi kotoran ternak memiliki kandungan unsur makro dan mikro yang penting bagi pertumbuhan tanaman, termasuk Cu dan Zn. Menurut analisis yang dilakukan, *bio-slurry* cair mengandung Cu dan Zn, dengan kandungan yang bervariasi tergantung pada jenis ternak yang digunakan (Hartanto dan Christina, 2013). Dalam penelitian ini, *bio-slurry* cair diaplikasikan secara *foliar* atau disemprotkan langsung pada permukaan daun, maka kontribusinya terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah tidak memberikan suplai secara langsung. Unsur Cu dan Zn yang terkandung dalam *bio-slurry* cair diserap secara langsung melalui stomata dan kutikula daun, sehingga hanya sebagian kecil larutan yang tidak terserap atau menetes dari permukaan daun yang berpotensi jatuh ke tanah dan memberikan suplai hara yang tidak berarti bagi cadangan Cu dan Zn tersedia dalam tanah. Meskipun demikian, aplikasi *foliar bio-slurry* cair tetap dapat memberikan manfaat tidak langsung bagi kondisi tanah melalui serasah daun yang gugur setelah menyerap unsur hara tersebut.

Selain aplikasi amelioran, pemupukan N, P, dan K juga berperan penting dalam penyediaan unsur hara makro esensial seperti nitrogen, fosfor, kalium yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah besar, namun juga dapat berdampak pada ketersediaan unsur mikro seperti Cu dan Zn. Dosis pemupukan yang tepat menjadi

faktor penting karena kelebihan unsur hara tertentu dapat menimbulkan antagonisme dengan unsur lainnya. Penelitian Cakmak dkk (2010) menunjukkan bahwa interaksi antara unsur P dan Zn bersifat antagonistik, dimana peningkatan P dapat menurunkan penyerapan Zn oleh tanaman, kemudian menurut Barik dan Chandel (2001) P dapat mengikat Cu dalam tanah sehingga mengurangi ketersediaan Cu dan mencegah Cu diserap tanaman. Penggunaan pupuk N, P, dan K dengan dosis yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pemupukan dan mengurangi risiko dampak negatif terhadap ketersediaan unsur mikro (Fageria, 2016).

Bahan amelioran dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk N, P, dan K melalui peningkatan KTK tanah yang mengurangi pencucian hara, serta perbaikan pH tanah yang mengoptimalkan ketersediaan unsur hara (Fischer dan Glaser, 2012). Penelitian Schulz dan Glaser (2012) menunjukkan bahwa kombinasi biochar dengan pupuk N, P, dan K meningkatkan retensi nitrogen dan fosfor dalam tanah, yang secara tidak langsung mempengaruhi dinamika unsur mikro. Penggunaan bahan amelioran bersama pupuk anorganik juga terbukti lebih efektif dalam meningkatkan kesuburan tanah jangka panjang dibandingkan penggunaan pupuk anorganik saja (Agegnehu dkk, 2016).

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan, penggunaan biochar sekam padi, pupuk kandang sapi dan *bio-slurry* serta pemupukan N, P, dan K kemungkinan dapat mempengaruhi ketersediaan unsur hara mikro terutama unsur Cu dan Zn di dalam tanah. Namun penelitian tentang pengaruh pemberian kombinasi biochar, pupuk kandang sapi dan *bio-slurry* serta pupuk N, P, dan K terhadap status ketersediaan unsur mikro Cu dan Zn di dalam tanah masih perlu dikaji lebih lanjut.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah pemberian kombinasi amelioran (biochar sekam padi+pupuk kandang sapi dan pupuk kandang sapi+*bio-slurry*) berpengaruh terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah?
2. Apakah pemberian pupuk N, P, dan K berpengaruh terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah?
3. Apakah terdapat pengaruh interaksi antara kombinasi bahan amelioran dan dosis pemupukan N,P, dan K terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah?

1.3. Tujuan

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mempelajari pengaruh pemberian kombinasi amelioran (biochar sekam padi+pupuk kandang sapi dan pupuk kandang sapi+*bio-slurry*) terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah.
2. Mempelajari pengaruh pemberian berbagai dosis pupuk N, P, dan K terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah.
3. Mempelajari pengaruh interaksi antara kombinasi bahan amelioran dan dosis pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah.

1.4. Kerangka Pemikiran

Ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah dipengaruhi oleh pH tanah, kandungan bahan organik, dan interaksi dengan unsur hara lainnya.

Alloway (2008) menyatakan bahwa pada tanah masam, ketersediaan Cu dan Zn cenderung tinggi namun akan menurun seiring dengan peningkatan pH. Namun, apabila kandungan Cu dan Zn dalam bahan induk tanah rendah, maka perubahan pH pun tidak akan mampu mempengaruhi ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah. Penelitian Rengel (2015) menunjukkan bahwa dinamika ketersediaan Cu dan Zn di rhizosfer tidak hanya dipengaruhi oleh pH tanah tetapi juga oleh aktivitas mikroorganisme, eksudasi akar, dan interaksi dengan koloid tanah. Bahan organik

memiliki peran dalam mengatur ketersediaan Cu dan Zn melalui mekanisme fisik dan kimia. Peningkatan kandungan C-organik tanah dapat berpengaruh positif terhadap ketersediaan Cu dan Zn. Hal ini terjadi karena peningkatan bahan organik juga meningkatkan kandungan asam-asam organik yang mudah larut seperti asam oksalat dan asam sitrat. Asam-asam organik ini memiliki gugus fungsional OH^- dan COOH^- yang dapat berikatan dengan ion-ion seperti Cu^{2+} dan Zn^{2+} membentuk kompleks organik menjadikan Cu dan Zn dalam bentuk yang lebih tersedia untuk diserap oleh tanaman (Afrilia, 2024).

Kompleksitas ketersediaan Cu dan Zn semakin meningkat akibat interaksi antagonis dengan unsur hara makro dan mikro lainnya dalam sistem tanah yang dinamis. Interaksi antagonis terjadi antara Zn dengan P, dimana aplikasi fosfat berlebihan menginduksi defisiensi Zn melalui pembentukan senyawa tidak larut *hopeite* ($\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) pada pH tinggi atau kompetisi penyerapan Zn dan P oleh akar (Cakmak dan Marschner, 1988; Rengel dan Basra, 1999). Kompetisi ionik antara Cu^{2+} dan Zn^{2+} dengan kation divalen Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Fe^{2+} untuk kompleks pertukaran koloid tanah menciptakan daya ikat dimana Cu^{2+} umumnya lebih dominan dibandingkan Zn^{2+} , sementara kehadiran Al^{3+} dalam tanah masam mempengaruhi mobilitas keduanya melalui kompetisi pertukaran kation dan perubahan muatan permukaan koloid.

Aplikasi bahan amelioran berupa biochar, pupuk kandang sapi dan *bio-slurry* merupakan salah satu pendekatan untuk memperbaiki kualitas tanah secara fisik, kimia dan biologi. Biochar, yang dihasilkan dari pirolisis biomassa, dapat meningkatkan sifat kimia tanah, termasuk pH, kapasitas tukar kation (KTK), dan kandungan bahan organik, yang semuanya berkontribusi pada kesuburan tanah (Mautuka dkk., 2022). Namun, interaksi antara gugus OH^- dalam biochar dengan ion Cu^{2+} dan Zn^{2+} dapat menyebabkan pembentukan kompleks yang mengikat kedua unsur tersebut, sehingga mengurangi ketersediaannya bagi tanaman (Agusalim dkk., 2010). Selaras dengan penelitian Lestari (2023) menunjukkan bahwa aplikasi biochar tongkol jagung dan batang singkong menurunkan ketersediaan Zn secara nyata akibat adsorpsi kuat oleh partikel biochar, sedangkan pengaruhnya terhadap Cu kurang signifikan. Biochar dengan luas permukaan

tinggi dan struktur karbon aromatik yang stabil memiliki kapasitas adsorpsi kuat terhadap Cu dan Zn, sehingga dapat menurunkan ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn (Chen dkk., 2011; Apori dkk., 2021).

Selain biochar, pupuk kandang sapi sebagai bahan amelioran berkontribusi pada perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang juga dapat mempengaruhi ketersediaan unsur hara mikro. Menurut Moral dkk. (2005), pupuk kandang sapi juga mengandung unsur mikro seperti Cu dan Zn yang dapat berkontribusi langsung terhadap ketersediaannya dalam tanah, meskipun jumlahnya bervariasi tergantung pada pakan dan pengelolaan ternak. Pemberian pupuk kandang sapi berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara mikro Zn dan Cu di dalam tanah melalui mekanisme suplai langsung dan peningkatan aktivitas bahan organik. Pupuk kandang sapi mengandung Zn sebesar 315 ppm (Wiryanta dan Bernardinus, 2002), yang secara langsung meningkatkan kadar Zn tersedia di tanah, terutama pada tanah dengan kandungan awal rendah.

Aplikasi pupuk kandang sapi menyumbangkan karbon organik ke dalam tanah yang selanjutnya mengalami dekomposisi oleh mikroorganisme dan menghasilkan asam-asam organik. Penelitian Sari dkk. (2017) menjelaskan bahwa dekomposisi bahan organik menghasilkan asam-asam organik (oksalat, sitrat) yang mengikat Zn^{2+} dan meningkatkan mobilitasnya. Namun, Selim (1997) mengemukakan bahwa pada tanah dengan kandungan bahan organik tinggi, retensi Zn dapat meningkat akibat ikatan kuat antara asam organik dan Zn, yang berpotensi mengurangi pelepasan Zn ke larutan tanah. Meski demikian, C-organik yang tinggi dari pupuk kandang sapi umumnya meningkatkan fraksi Zn yang terekstraksi (Sillanpaa, 1982), karena kompleksasi tersebut menjaga Zn dalam bentuk tersedia secara bertahap. Di sisi lain, asam humat dan fulvat cenderung mengikat ion Cu^{2+} membentuk kompleks organik stabil (Alloway, 2008), sehingga mengurangi ketersediaannya secara langsung bagi tanaman. Meskipun peningkatan C-organik dari pupuk kandang sapi berpotensi memperbaiki kapasitas pertukaran kation tanah (Dobermann dan Fairhurst, 2000), dominasi mekanisme stabilisasi Cu oleh asam organik dan mineral tanah menyebabkan ketersediaannya tetap terbatas.

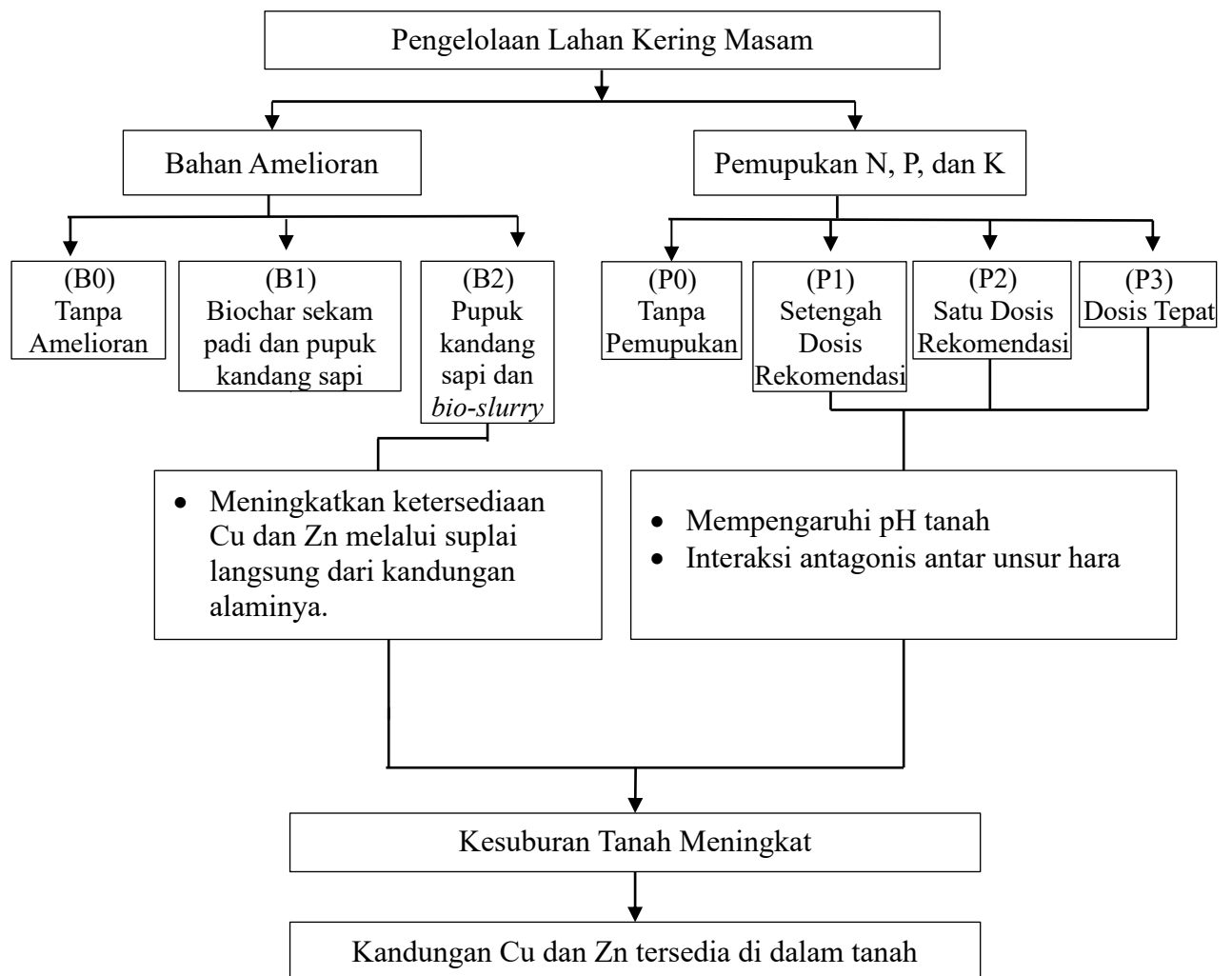
Sementara *bio-slurry* cair dari fermentasi kotoran ternak berfungsi sebagai pupuk organik yang kaya unsur makro dan mikro esensial untuk pertumbuhan tanaman, termasuk Cu dan Zn. Hasil analisis menunjukkan bahwa *bio-slurry* cair memiliki kandungan Cu (4,5-36,23 ppm) dan Zn (3,54 ppm) dalam bentuk ion Cu^{2+} dan Zn^{2+} yang langsung dapat diserap tanaman tanpa pelarutan lebih lanjut (Hartanto dan Christina, 2013). Pada penelitian ini, aplikasi dilakukan secara *foliar* dengan menyemprot langsung ke daun, memungkinkan penyerapan melalui stomata dan kutikula tanpa mineralisasi di tanah. Akibatnya, *bio-slurry* tidak menyediakan Cu dan Zn langsung ke tanah, melainkan hanya sebagian kecil tetesan yang mengandung asam-asam organik. Sibagariang dkk. (2022) menyatakan bahwa asam humat dari tetesan tersebut merangsang aktivitas mikroba dan mobilitas hara di tanah, sehingga unsur makro serta mikro lebih mudah diakses akar tanaman.

Pemupukan N, P, dan K merupakan upaya untuk menambah unsur hara makro esensial di dalam tanah, namun juga dapat berpengaruh pada ketersediaan unsur mikro Cu dan Zn. Penelitian Lestari (2023) menunjukkan bahwa aplikasi pupuk dengan dosis Urea 435 kg ha^{-1} , TSP $222,2 \text{ kg ha}^{-1}$, dan KCl 200 kg ha^{-1} tidak memberikan perbedaan signifikan dibandingkan tanpa pemupukan terhadap ketersediaan unsur Cu dan Zn pada tanah Ultisol yang ditanami jagung. Demikian pula dengan penelitian Afrilia (2024) yang menunjukkan bahwa peningkatan dosis pemupukan N, P, dan K dari tanpa pemupukan, setengah dosis rekomendasi (Urea 225 kg ha^{-1} , TSP $112,5 \text{ kg ha}^{-1}$, dan KCl 100 kg ha^{-1}), hingga satu dosis rekomendasi penuh (Urea 450 kg ha^{-1} , TSP 225 kg ha^{-1} , dan KCl 200 kg ha^{-1}) tidak menghasilkan perbedaan yang nyata secara statistik terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah. Dobermann dan Fairhurst (2000) menyatakan bahwa pemupukan N, P, dan K yang berlebihan dapat menimbulkan ketidakseimbangan hara yang berdampak negatif terhadap ketersediaan unsur mikro. Selain itu, dosis pemupukan N, P, dan K yang tepat menjadi faktor penting dalam optimalisasi ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah.

Menurut Barber (1995), efisiensi pemupukan N, P, dan K dapat ditingkatkan melalui aplikasi bahan amelioran yang dapat memperbaiki sifat tanah dan mengurangi fiksasi unsur hara, sehingga lebih tersedia bagi tanaman. Penelitian

Chen dkk (2013) menunjukkan bahwa aplikasi bahan organik bersama pupuk anorganik dapat memperbaiki keseimbangan hara makro dan mikro dalam tanah serta meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk. Menurut Hasil penelitian Afrilia (2024) menunjukkan bahwa kombinasi biochar dengan pupuk kandang sapi dan pemupukan N, P, dan K memberikan respons yang berbeda terhadap ketersediaan Cu dan Zn dalam tanah. Untuk ketersediaan Cu, terdapat pengaruh interaksi yang sangat nyata antara kombinasi biochar, pupuk kandang sapi dengan pemupukan N, P, dan K, namun secara praktis tidak menghasilkan perbedaan kandungan Cu tersedia yang nyata antar perlakuan karena konsentrasinya yang relatif rendah ($0,19-0,42 \text{ mg kg}^{-1}$). Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat pengaruh interaksi statistik yang signifikan, kandungan Cu dalam tanah masih terbatas dengan beberapa perlakuan bahkan mencapai tingkat defisiensi ($< 0,3 \text{ mg kg}^{-1}$). Pemupukan N, P, dan K sendiri tidak berpengaruh nyata terhadap ketersediaan Cu, begitu juga dengan pemberian kombinasi biochar dan pupuk kandang sapi tanpa pupuk N, P, dan K.

Berbeda dengan Cu, ketersediaan Zn menunjukkan respons yang lebih jelas terhadap perlakuan yang diberikan. Kombinasi biochar dan pupuk kandang sapi berpengaruh nyata terhadap ketersediaan Zn, dengan biochar tongkol jagung + pupuk kandang sapi menghasilkan Zn tersedia tertinggi yang berbeda nyata dibandingkan kontrol namun tidak berbeda dengan biochar sekam padi dan biochar batang singkong yang keduanya dikombinasikan dengan pupuk kandang sapi. Pemupukan N, P, dan K tidak berpengaruh terhadap ketersediaan Zn, dan tidak terdapat pengaruh interaksi antara kombinasi biochar dan pupuk kandang sapi dengan pemupukan N, P, dan K. Peningkatan ketersediaan Zn ini disebabkan oleh suplai langsung dari pupuk kandang sapi, serta peningkatan aktivitas mikroorganisme yang mempercepat proses mineralisasi bahan organik sesuai dengan temuan Salawati dkk. (2022). Berdasarkan teori yang telah dikemukakan, maka skema kerangka pemikiran dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1. Kerangka pemikiran pengaruh amelioran dan pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah pada lahan pertanian jagung manis.

1.5. Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah disusun, didapatkan hipotesis sebagai berikut :

1. Perlakuan kombinasi pupuk kandang sapi dan *bio-slurry* meningkatkan ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah.
2. Pemupukan N, P, dan K tidak berpengaruh terhadap ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah.
3. Interaksi antara pemberian kombinasi pupuk kandang sapi dan *bio-slurry* dengan pemupukan N, P, dan K dosis tepat meningkatkan ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pentingnya Unsur Hara Mikro Cu dan Zn Bagi Tanaman

Unsur hara mikro Cu dan Zn memiliki peranan vital dalam mendukung pertumbuhan, perkembangan, dan produktivitas tanaman meskipun dibutuhkan dalam jumlah yang relatif kecil. Unsur Cu berperan sebagai komponen penting dalam berbagai proses metabolisme tanaman, terutama sebagai penyusun plastosianin yang berfungsi dalam transfer elektron pada fotosistem I dan stabilisator klorofil, sehingga defisiensi Cu dapat menyebabkan penurunan efisiensi fotosintesis dan akumulasi karbohidrat dalam daun (Yruela, 2005; Marschner, 2012). Selain itu, Cu juga berperan sebagai kofaktor dalam berbagai enzim seperti *cytochrome oxidase*, *laccase*, dan *ascorbate oxidase* yang terlibat dalam respirasi sel, lignifikasi dinding sel, dan metabolisme fenol (Pilon dkk., 2006). Kandungan Cu di dalam tubuh tanaman juga membentuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang berperan sebagai basa kuat dengan sifat antimikrobia, mampu melindungi tanaman dari serangan patogen dan meningkatkan sistem pertahanan alami tanaman (Kusumawati, 2021; Lambers dkk., 2008). Konsentrasi Cu yang optimal dalam jaringan tanaman berkisar antara 7-30 ppm, dan tanaman menyerap Cu dari tanah dalam bentuk Cu^{2+} atau sebagai senyawa kompleks organik yang lebih mudah tersedia bagi akar tanaman (Handayanto dkk., 2017).

Unsur hara mikro Zn memiliki fungsi yang sangat beragam dan kompleks dalam sistem biologis tanaman sebagai kofaktor lebih dari 300 enzim yang terlibat dalam berbagai proses metabolisme fundamental. Zn berperan dalam sintesis protein melalui aktivasi RNA polymerase dan ribosom, metabolisme karbohidrat terutama dalam aktivitas enzim aldolase dan enolase, serta biosintesis hormon pertumbuhan seperti asam indole asetat (IAA) yang mengatur pemanjangan sel dan diferensiasi jaringan tanaman (Broadley dkk., 2007; Cakmak, 2008). Selain itu, Zn

memainkan peran struktural dalam pemeliharaan integritas membran sel, dan stabilisasi struktur protein (Sinclair dan Krämer, 2012). Unsur Zn juga terlibat dalam proses detoksifikasi radikal bebas melalui aktivasi enzim *superoxide dismutase* (SOD) yang melindungi sel dari stres oksidatif, serta berperan dalam metabolisme nitrogen dan fosfor yang penting untuk pertumbuhan vegetatif tanaman (Hafeez dkk., 2013). Tanaman menyerap Zn dari tanah dalam bentuk Zn^{2+} pada kondisi pH normal, namun pada tanah dengan pH tinggi diserap dalam bentuk $ZnOH^+$, dengan konsentrasi optimal dalam jaringan tanaman berkisar 15-100 ppm tergantung spesies dan organ tanaman (Alloway, 2009; White dan Broadley, 2011).

Defisiensi unsur hara mikro Cu dan Zn dapat menyebabkan berbagai gangguan fisiologis dan morfologis yang berdampak serius terhadap produktivitas tanaman. Gejala defisiensi Cu yang umum terjadi meliputi klorosis pada daun muda, nekrosis ujung dan tepi daun, pertumbuhan yang terhambat, serta gangguan pada pembentukan biji dan buah karena tergangguya proses reproduksi (Marschner, 2012). Sementara itu, defisiensi Zn menunjukkan gejala yang lebih khas seperti pertumbuhan kerdil, klorosis pada daun muda, ruas dan tangkai daun yang memendek, serta pengelompokan daun kecil yang cacat di bagian atas tanaman yang dikenal sebagai gejala roset klasik pada tanaman dikotil (Alloway, 2009; Rehman dkk., 2012). Defisiensi tersembunyi juga dapat terjadi dimana hasil dan kualitas panen menurun tanpa menimbulkan gejala visual yang jelas, sehingga sering tidak disadari oleh petani namun berdampak signifikan terhadap produktivitas ekonomi (Cakmak, 2008). Kondisi defisiensi ini tidak hanya mempengaruhi aspek kuantitatif hasil panen, tetapi juga menurunkan kualitas nutrisi produk pertanian, terutama kandungan protein dan vitamin yang penting bagi kesehatan manusia (Gibson, 2012; Joy dkk., 2014).

2.2 Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah

Tembaga (Cu), atau dikenal secara kimia sebagai cupprum, merupakan logam berat berbentuk kristal dengan warna kemerahan yang khas. Berbeda dengan logam berat toksik seperti merkuri (Hg), kadmium (Cd), dan kromium (Cr), Cu

termasuk dalam kategori logam berat esensial. Artinya, meskipun Cu dapat bersifat racun dalam jumlah besar, keberadaannya tetap diperlukan bagi tubuh makhluk hidup dalam kadar kecil. Unsur ini berperan penting dalam berbagai aktivitas metabolisme tumbuhan dan hewan. Cu tersedia di dalam tanah berasal dari pelapukan beberapa mineral seperti Cu sulfat, Cu sulfida, dan Cu karbonat, dengan kandungan terbesar ditemukan pada mineral Calcopirit yang mengandung sekitar 34% Cu (Hodges, 2011).

Di dalam tanah, tembaga tersedia dalam beberapa bentuk kimia yang menentukan tingkat ketersediaannya bagi tanaman, antara lain ion bebas Cu^{2+} , Cu yang dapat dipertukarkan (Cu-dd), serta Cu yang terikat dalam bentuk kompleks organik, dimana kompleks Cu-organik merupakan bentuk yang paling dominan yaitu lebih dari 90% dari total kandungan Cu dalam tanah. Kondisi lingkungan tanah seperti pH, bahan organik dan interaksi antar ion memiliki pengaruh yang kompleks terhadap ketersediaan Cu dan Zn dalam tanah melalui mekanisme adsorpsi-desorpsi dan kompetisi ionik. Tanah bertekstur halus dengan kandungan liat tinggi memiliki kapasitas mengikat Cu dan Zn yang lebih besar karena luas permukaan spesifik yang tinggi dan situs pertukaran kation yang banyak, namun hal ini dapat mengurangi ketersediaan kedua unsur bagi tanaman karena terikat kuat pada mineral liat. Sebaliknya, tanah berpasir memiliki ketersediaan Cu dan Zn yang lebih tinggi dalam larutan tanah tetapi berisiko kehilangan melalui pencucian ke lapisan yang lebih dalam, sementara tanah dengan pH masam cenderung meningkatkan kelarutan Cu namun keberadaan bahan organik tinggi justru dapat menurunkan jumlah Cu tersedia akibat pembentukan ikatan kompleks (Sparks, 2003). Sementara interaksi antar ion menciptakan kompetisi yang signifikan dimana Cu^{2+} umumnya memiliki afinitas lebih tinggi dibandingkan Zn^{2+} untuk situs adsorpsi yang sama, dan kehadiran Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Al^{3+} dapat mempengaruhi mobilitas kedua unsur melalui kompetisi pertukaran kation (Adriano, 2001; Marschner, 2012). Interaksi antagonis yang paling penting adalah antara Zn dan P dimana aplikasi fosfat berlebihan dapat menginduksi defisiensi Zn melalui pembentukan senyawa tidak larut atau kompetisi penyerapan oleh tanaman, sedangkan rasio Fe dengan Zn yang tinggi juga dapat menghambat penyerapan Zn karena penggunaan pembawa yang sama dalam sistem perakaran.

Ketersediaan Zn dalam tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling berinteraksi, dimana pH tanah merupakan faktor dominan karena peningkatan pH dapat menurunkan ketersediaan Zn akibat meningkatnya hidrolisis ion Zn^{2+} menjadi $Zn(OH)^+$ dan $Zn(OH)_2$ yang kurang tersedia, serta meningkatnya adsorpsi spesifik pada permukaan oksida Fe dan Al (Lindsay dan Norvell, 1978; Alloway, 2009).

Kandungan bahan organik memiliki efek ganda terhadap ketersediaan Zn, dimana pada konsentrasi rendah hingga sedang dapat meningkatkan mobilitas Zn melalui pembentukan ikatan khelat yang dapat larut seperti Zn-fulvat dan Zn-humat, namun pada konsentrasi tinggi justru dapat mengikat Zn secara kuat dalam bentuk kompleks stabil yang sulit diserap tanaman (Stevenson, 1994; Spark dkk., 1995). Tekstur tanah berpengaruh melalui kapasitas adsorpsi dimana tanah berliat memiliki kemampuan mengikat Zn lebih tinggi karena luas permukaan yang besar dan kepadatan muatan negatif, sementara tanah berpasir dengan koloid rendah menyebabkan Zn mudah tercuci tetapi lebih tersedia dalam larutan tanah (McBride, 1994). Kandungan karbonat ($CaCO_3$) dalam tanah dapat menurunkan ketersediaan Zn melalui dua mekanisme yaitu peningkatan pH tanah yang menginduksi presipitasi $Zn(OH)_2$ dan adsorpsi langsung ion Zn^{2+} pada permukaan $CaCO_3$ membentuk senyawa $ZnCO_3$ yang tidak larut (Jurinak dan Bauer, 1956; Mortvedt, 1991). Interaksi dengan unsur hara lain menciptakan kompetisi dan antagonisme yang signifikan, terutama dengan P yang dapat membentuk hopeite ($Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$) pada pH tinggi, kompetisi dengan Ca^{2+} dan Mg^{2+} untuk pertukaran kation, serta dengan Fe dan Mn yang dapat menghambat penyerapan Zn karena penggunaan pembawar logam yang sama dalam sistem perakaran (Cakmak dan Marschner, 1988; Rengel dan Basra, 1999; Broadley dkk., 2007).

2.3 Pengaruh Amelioran dan Pemupukan N, P, dan K terhadap Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah

Ketersediaan Cu dan Zn dalam tanah merupakan faktor yang dapat mempengaruhi produktivitas tanaman dan kualitas hasil panen. Menurut Simarmata dkk (2020) defisiensi Cu dan Zn pada tanah-tanah yang memiliki pH basa dan kandungan bahan

organik rendah. Ketersediaan kedua unsur hara mikro ini sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik dan kimia tanah seperti pH, kapasitas tukar kation, kandungan bahan organik. Faktor-faktor tersebut saling berinteraksi dalam menentukan bentuk dan mobilitas Cu dan Zn di dalam tanah.

Biochar sebagai amelioran memiliki karakteristik unik yang dapat mempengaruhi ketersediaan unsur hara mikro melalui berbagai mekanisme kompleks. Menurut Hartono dkk (2021) biochar memiliki struktur pori yang berkembang dan luas permukaan yang tinggi sehingga mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi dan retensi unsur hara. Kandungan gugus fungsional pada permukaan biochar seperti karboksil, hidroksil, dan fenolik berperan penting dalam pembentukan ikatan khelat dengan ion Cu^{2+} dan Zn^{2+} yang membuatnya lebih tersedia bagi tanaman. Aplikasi biochar juga mampu meningkatkan pH tanah masam dan menstabilkan kondisi redoks tanah sehingga mengurangi fiksasi Cu dan Zn dalam bentuk yang tidak tersedia.

Selain biochar pupuk kandang sapi juga dapat meningkatkan ketersediaan Cu dan Zn melalui proses dekomposisi dan mineralisasi. Menurut Stevenson (1994) dalam pupuk kandang sapi mengandung asam-asam organik seperti asam humat dan fulvat yang mampu membentuk senyawa khelat dengan Cu dan Zn sehingga mencegah presipitasi dan fiksasi oleh mineral liat. Proses dekomposisi bahan organik juga menghasilkan CO_2 yang dapat melarutkan mineral-mineral pembawa Cu dan Zn dalam tanah. Aktivitas mikroorganisme yang meningkat akibat penambahan pupuk kandang sapi berkontribusi dalam transformasi Cu dan Zn dari bentuk yang terikat menjadi bentuk yang dapat dipertukarkan. Aplikasi pupuk kandang sapi dengan dosis 15-20 ton ha^{-1} mampu meningkatkan populasi mikroorganisme pelarut fosfat yang secara tidak langsung membantu pelepasan Cu dan Zn yang terikat dengan fosfat dalam tanah. Kombinasi pupuk kandang sapi dengan amelioran lain terbukti memberikan efek sinergis dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara mikro.

Bio-slurry, sebagai hasil sampingan biogas mengandung unsur makro serta mikro yang penting untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Hartanto dan Christina (2013) menunjukkan bahwa *bio-slurry* menyediakan Cu (4,5-36,23 ppm) dan Zn (3,54 ppm) dalam wujud ion Cu^{2+} dan Zn^{2+} yang langsung siap diserap tanaman tanpa pelarutan.

Penelitian ini menerapkan *bio-slurry* cair secara *foliar* dengan penyemprotan langsung ke daun, memungkinkan penyerapan melalui stomata dan kutikula tanpa mineralisasi tanah. Oleh karena itu, *bio-slurry* yang diaplikasikan secara *foliar* tidak berperan dalam menyuplai Cu dan Zn secara langsung ke dalam tanah, melainkan hanya sebagian kecil larutan yang tidak terserap daun dan menetes ke permukaan tanah. Meskipun demikian, tetesan *bio-slurry* yang jatuh ke tanah tetap membawa asam humat dan asam-asam organik yang dapat meningkatkan aktivitas mikroba serta pergerakan unsur hara dalam tanah, sehingga unsur makro dan mikro yang berada di larutan tanah menjadi lebih mudah diserap oleh akar tanaman (Sibagariang dkk., 2022; Masi dkk., 2015). Keunggulan *bio-slurry* dibandingkan pupuk kandang biasa terletak pada kandungan mikroba probiotiknya yang membantu transformasi unsur hara mikro dari bentuk terikat menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman, sehingga efisiensi penyerapan Cu dan Zn oleh tanaman tetap dapat meningkat meskipun aplikasi dilakukan secara *foliar* (Wildan, 2018).

Pemupukan N, P, dan K memiliki interaksi dengan ketersediaan Cu dan Zn dalam tanah yang dapat bersifat sinergis maupun antagonis tergantung pada dosis dan kondisi tanah. Kutman dkk. (2011) menyatakan bahwa nitrogen dapat meningkatkan penyerapan Zn oleh akar serta translokasinya ke pucuk tanaman. Namun, hubungan antara nitrogen dan Zn ini bersifat kompleks, karena meskipun nitrogen dapat meningkatkan penyerapan Zn, kadar nitrogen yang terlalu tinggi justru dapat menyebabkan defisiensi Zn pada tanaman, terutama di tanah yang memang kekurangan Zn (Camp dan Fudge, 1945; Ozanne, 1955). Namun, aplikasi fosfor yang berlebihan dapat menyebabkan fiksasi Zn melalui pembentukan senyawa $Zn_3(PO_4)_2$ yang sukar larut, sehingga mengurangi ketersediaan Zn bagi tanaman. Kalium dalam pupuk KCl berperan dalam mempertahankan keseimbangan ionik dalam tanah dan memfasilitasi serapan unsur hara mikro oleh akar tanaman. Interaksi antara pupuk N, P, dan K dengan ameliorant menciptakan kondisi rhizosfer yang kondusif untuk ketersediaan dan serapan unsur hara mikro oleh tanaman.

2.4 Pengaruh pH, C-organik dan P-tersedia terhadap Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah.

Ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaannya, tetapi juga oleh sifat kimia tanah seperti pH, C-organik, dan P-tersedia. Faktor-faktor ini berperan dalam menentukan bentuk, dan kelarutan Cu dan Zn di dalam tanah. pH tanah dapat memengaruhi ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah karena secara langsung mempengaruhi kelarutan dan adsorpsi kedua unsur hara mikro tersebut. Pada kondisi pH masam, ion Cu^{2+} dan Zn^{2+} berada dalam bentuk bebas yang mudah larut sehingga ketersediaannya dalam larutan tanah meningkat, namun pada kondisi yang sangat masam risiko toksisitas bagi tanaman juga meningkat. Sebaliknya, setiap peningkatan pH tanah dapat menurunkan ketersediaan Zn karena terjadi hidrolisis Zn^{2+} menjadi $\text{Zn}(\text{OH})^+$ dan $\text{Zn}(\text{OH})_2$ yang tidak larut, serta meningkatnya adsorpsi Zn pada permukaan oksida Fe dan Al (Havlin dkk., 1999). Hal serupa terjadi pada Cu dimana pada pH basa terbentuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$ dan CuCO_3 yang mengendap sehingga konsentrasi Cu dalam larutan tanah menurun (Sparks, 2003).

C-organik tanah dapat mempengaruhi ketersediaan unsur hara mikro, termasuk Cu dan Zn, melalui mekanisme kompleksasi, adsorpsi, serta perubahan dinamika kimia di dalam tanah. Bahan organik yang terdekomposisi menghasilkan fraksi bahan organik terlarut yang memiliki gugus fungsional seperti karboksil ($-\text{COOH}$) dan fenolik ($-\text{OH}$) yang mampu berikatan dengan ion logam seperti Cu^{2+} dan Zn^{2+} membentuk khelat organik. Khelat ini dapat meningkatkan mobilitas logam dalam larutan tanah, tetapi dalam kondisi tertentu juga dapat menurunkan ketersediaannya bagi tanaman akibat terbentuknya ikatan yang stabil (Laurent dkk., 2020). Pengaruh C-organik terhadap Cu dan Zn tergantung pada jumlah serta karakteristik bahan organik. Pada kandungan C-organik rendah hingga sedang, peningkatan bahan organik cenderung meningkatkan ketersediaan Cu dan Zn melalui pembentukan kompleks organik larut yang menjaga kedua unsur tetap berada dalam fase larutan tanah. Di sisi lain, aktivitas mikroorganisme tanah yang meningkat akibat tingginya C-organik juga berperan dalam transformasi Cu dan Zn.

Mikroorganisme dapat memineralisasi senyawa organik yang mengikat logam sehingga melepaskan kembali Cu dan Zn ke dalam larutan tanah (Feng dkk., 2024).

P-tersedia di dalam tanah memiliki interaksi antagonis terhadap ketersediaan Zn dan secara tidak langsung mempengaruhi Cu. Mekanisme antagonisme P–Zn terjadi akibat pembentukan senyawa tidak larut $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ (hopeite) pada kondisi pH netral hingga basa yang mengendapkan Zn dari larutan tanah (Cakmak dan Marschner, 1988; Broadley dkk., 2007). Lestari (2023) dalam penelitiannya pada tanah Ultisols di Lampung menemukan bahwa pemberian pupuk P dengan dosis tinggi secara nyata menurunkan ketersediaan Zn di dalam tanah, dan efek penurunan ini dapat dikurangi dengan aplikasi biochar yang mampu menstabilkan pH tanah dan menyediakan gugus fungsional yang mengikat P berlebih. Pengaruh P-tersedia terhadap Cu bersifat tidak langsung yaitu melalui perubahan pH rhizosfer akibat serapan ion fosfat yang meningkatkan eksudasi asam organik dari akar, yang selanjutnya dapat melarutkan Cu dari bentuk kompleks organik menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman (Rengel, 2015)

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Percobaan lapang dilakukan pada 2 September sampai 3 Desember 2024 yang berlokasi di Balai Pelatihan Pertanian Lampung, Kecamatan Natar, Kabupaten Lampung Selatan. Sedangkan analisis sampel tanah dilaksanakan pada bulan Juli sampai dengan September 2025 di Laboratorium Kimia Tanah, Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk analisis, yaitu neraca analitik, botol kocok, mesin kocok, kertas saring *Whatman* no 42, sentrifius, tabung reaksi, rak tabung reaksi, oven, pipet tetes, AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*), batang pengaduk, labu ukur, gelas ukur, pH meter, dan kertas label. Sedangkan alat yang digunakan di lahan, yaitu cangkul, sekop, pisau, meteran, ember, selang, dan baskom. Bahan yang akan digunakan untuk analisis antara lain larutan pengekstrak DTPA pH 7,3, larutan standar Cu dan Zn, sampel tanah akhir, pupuk TSP, pupuk Urea, pupuk KCl, biochar sekam padi, pupuk kandang sapi, *bio-slurry*, HCl 0,1 N.

3.3 Metode

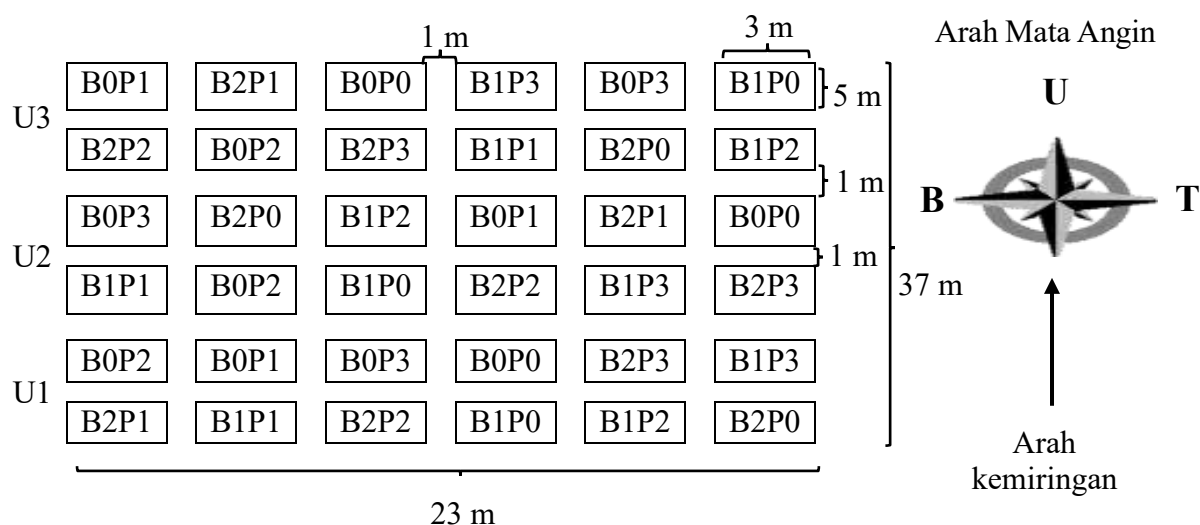
Percobaan ini dirancang menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan dua faktor untuk mengkaji respon pupuk N, P, dan K dan bahan amelioran (biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi) terhadap ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah. Faktor pertama adalah jenis bahan amelioran yang terdiri tanpa bahan amelioran (B₀), kombinasi biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi (B₁), dan kombinasi pupuk kandang sapi dan *bio-slurry* (B₂).

Faktor kedua adalah dosis pupuk N, P, dan K yang terdiri dari tanpa pupuk N, P, dan K (P_0), pupuk N, P, dan K setengah dosis rekomendasi (P_1), pupuk N, P, dan K satu dosis rekomendasi (P_2), dan pupuk N, P, dan K dengan dosis tepat (P_3). Kombinasi kedua faktor menghasilkan 12 perlakuan dengan tiga ulangan, sehingga diperoleh 36 satuan percobaan, dan tata letak petak percobaan beserta susunan perlakuan di lapang ditampilkan pada Gambar 2.

Perlakuan dalam penelitian ini adalah:

1. B_0P_0 = Bahan amelioran 0 ton ha^{-1} + tanpa pemupukan
2. B_0P_1 = Bahan amelioran 0 ton ha^{-1} + $\frac{1}{2}$ dosis rekomendasi N, P, dan K (Urea 175 kg ha^{-1} , TSP 58,7 kg ha^{-1} , dan KCl 50 kg ha^{-1})
3. B_0P_2 = Bahan amelioran 0 ton ha^{-1} + 1 dosis rekomendasi N, P, dan K (Urea 350 kg ha^{-1} , TSP 117,4 kg ha^{-1} , dan KCl 100 kg ha^{-1})
4. B_0P_3 = Bahan amelioran 0 ton ha^{-1} + dosis tepat N, P, dan K (Urea 301,3 kg ha^{-1} , TSP 14,04 kg ha^{-1} , dan KCl 0 kg ha^{-1}).
5. B_1P_0 = (Biochar sekam padi 5 ton ha^{-1} dan Pupuk kandang sapi 5 ton ha^{-1}) + tanpa pemupukan
6. B_1P_1 = (Biochar sekam padi 5 ton ha^{-1} dan Pupuk kandang sapi 5 ton ha^{-1}) + $\frac{1}{2}$ dosis rekomendasi N, P, dan K (Urea 175 kg ha^{-1} , TSP 58,7 kg ha^{-1} , dan KCl 50 kg ha^{-1})
7. B_1P_2 = (Biochar sekam padi 5 ton ha^{-1} dan Pupuk kandang sapi 5 ton ha^{-1}) + 1 dosis rekomendasi N, P, dan K (Urea 350 kg ha^{-1} , TSP 117,4 kg ha^{-1} , dan KCl 100 kg ha^{-1})
8. B_1P_3 = (Biochar sekam padi 5 ton ha^{-1} dan Pupuk kandang sapi 5 ton ha^{-1}) + dosis tepat N, P, dan K (Urea 301,3 kg ha^{-1} , TSP 14,04 kg ha^{-1} , dan KCl 0 kg ha^{-1}).
9. B_2P_0 = (Pupuk kandang sapi 5 ton ha^{-1} + *bio-slurry* 50 L ha^{-1}) + tanpa pemupukan
10. B_2P_1 = (Pupuk kandang sapi 5 ton ha^{-1} + *bio-slurry* 50 L ha^{-1}) + $\frac{1}{2}$ dosis rekomendasi N, P, dan K (Urea 175 kg ha^{-1} , TSP 58,7 kg ha^{-1} , dan KCl 50 kg ha^{-1})
11. B_2P_2 = (Pupuk kandang sapi 5 ton ha^{-1} + *bio-slurry* 50 L ha^{-1}) + 1 dosis rekomendasi N, P, dan K (Urea 350 kg ha^{-1} , TSP 117,4 kg ha^{-1} , dan KCl 100 kg ha^{-1})

12. B₂P₃ = (Pupuk kandang sapi 5 ton ha⁻¹ + *bio-slurry* 50 L ha⁻¹) + dosis tepat N, P, dan K (Urea 301,3 kg ha⁻¹, TSP 14,04 kg ha⁻¹, dan KCl 0 kg ha⁻¹).



Gambar 2. Tata Letak Petak Percobaan dan Perlakuan di Lapangan.

3.4 Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Penyiapan Lahan

Persiapan lahan dimulai dengan pengukuran luas lahan sebesar 23 m x 37 m. Setelah itu, ditandai dengan memberi penanda dari bambu dan tali nilon. Lalu, dilakukan pengolahan tanah maksimum (*Intensif Tillage*) dengan menggunakan bajak rotari. Kegiatan olah tanah ini bertujuan untuk memecah lapisan tanah yang keras sehingga tanah menjadi lebih gembur dan mudah untuk ditanami. Setelah lapisan tanah yang keras terpecah akibat rotari, maka selanjutnya bongkahan tanah tersebut digemburkan kembali dengan cara manual menggunakan cangkul untuk memastikan tanah benar-benar gembur. Tahap selanjutnya adalah membuat tiga kelompok plot dengan tiap plot memiliki 12 petak percobaan. Masing-masing petak memiliki luas 3 m x 5 m.

3.4.2 Aplikasi Amelioran

Pengaplikasian bahan amelioran yaitu biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi sebagai perlakuan dilakukan setelah pengolahan tanah dan sebelum tanam

dengan masing-masing dosis 5 ton ha⁻¹. Aplikasi bahan amelioran dilakukan pada petak yang memperoleh perlakuan dengan cara menaburkan biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi pada permukaan tanah. Biochar sekam padi yang diberikan pada setiap petak sebesar 8,8 kg dengan kadar air 17%. Sedangkan pupuk kandang sapi yang diberikan pada setiap petaknya sebesar 11,1 kg dengan kadar air 48%. Kemudian tanah yang telah diaplikasikan diaduk menggunakan cangkul agar biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi tercampur secara merata di tanah. Aplikasi *bio-slurry* dilakukan sebanyak 3 kali, yaitu pada 4, 6, dan 8 MST. *Bio-slurry* disemprotkan ke bagian daun menggunakan sprayer dengan dosis 75 ml petak⁻¹ (Edy dkk., 2021).

3.4.3 Penanaman

Penanaman benih jagung manis dilakukan pada pagi hari untuk menjaga kelembaban tanah, sehingga benih terhindar dari stres dan perkecambahannya tidak terganggu. Benih yang dipilih adalah jagung manis varietas Pertiwi Exotic. Prosesnya dimulai dengan membuat lubang tanam sedalam sekitar 3-5 cm dengan jarak tanam 75 cm × 25 cm menggunakan tugal kayu, lalu satu jagung diletakkan di tiap lubang. Bersamaan dengan penanaman di petak percobaan, juga dilakukan penanaman cadangan di polybag yang diisi tanah untuk menyediakan bibit pengganti jika ada tanaman yang gagal tumbuh di petak percobaan. Setelah itu, petak percobaan disiram air untuk mempertahankan kelembaban tanah agar perkecambahan berjalan optimal.

3.4.4 Pemupukan

Pupuk yang digunakan dalam penelitian ini adalah pupuk N, P, dan K berupa pupuk Urea, pupuk TSP, dan pupuk KCl dengan empat taraf dosis pemupukan yaitu tanpa pemupukan, ½ dosis rekomendasi pemupukan, 1 dosis rekomendasi pemupukan, dan pemupukan dosis tepat. Berikut merupakan dosis pupuk dan jenis pupuk yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Aplikasi pupuk KCl dan pupuk TSP dilakukan sebanyak satu kali selama masa tanam yaitu saat tanaman berumur 16 Hari Setelah Tanam (HST) dan aplikasi

pupuk Urea dilakukan sebanyak dua kali selama musim tanam, yaitu saat tanaman berumur 16 HST dan pada 38 HST. Pengaplikasian pupuk dilakukan dengan cara membuat larikan dengan jarak ± 5 cm dari akar.

Tabel 1. Dosis Pemupukan dan Jenis Pupuk

Jenis Pupuk	P ₁ (Dosis ½)	P ₂ (Dosis 1)	P ₃ (Dosis tepat)
Urea (N)	175 kg ha ⁻¹ (262 g petak ⁻¹)	350 kg ha ⁻¹ (525 g petak ⁻¹)	301,30 kg ha ⁻¹ (450 g petak ⁻¹)
TSP (P)	58,7 kg ha ⁻¹ (88 g petak ⁻¹)	117,4 kg ha ⁻¹ (176 g petak ⁻¹)	14,04 kg ha ⁻¹ (21,06 g petak ⁻¹)
KCl (K)	50 kg ha ⁻¹ (75 g petak ⁻¹)	100 kg ha ⁻¹ (150 g petak ⁻¹)	(0 g petak ⁻¹)

Pemupukan dosis tepat dihitung berdasarkan analisis tanah awal sebelum penanaman antara lain : N total tanah sebesar 0,14%, P-tersedia sebesar 10,38 ppm, K-dd sebesar 0,42 cmol_c kg⁻¹. berdasarkan perhitungan dosis tepat masing-masing pupuk yang perlu ditambahkan pada lahan yaitu urea 0,45 kg petak⁻¹, TSP 0,02106 kg petak⁻¹, dan untuk KCl tidak diperlukan penambahan dikarenakan berdasarkan perhitungan kadar kalium dalam tanah sudah berlebih yaitu sebesar 394,08 kg ha⁻¹.

3.4.5 Pemeliharaan Tanaman

Pemeliharaan tanaman ini mencakup kegiatan penyulaman, penyiraman, penyiangan gulma, serta penyemprotan pestisida nabati yang bertujuan untuk mengendalikan serangan hama dan penyakit pada tanaman jagung. Penyulaman dilakukan saat tanaman berusia 7 HST, dengan mengganti benih jagung yang tidak tumbuh menggunakan tanaman cadangan yang telah disemai sebelumnya di karung tanam. Hal ini dilakukan agar umur tanaman hasil sulaman tetap sama dengan umur tanaman yang ditanam sejak awal di petakan. Penyiraman tanaman jagung dilakukan sebanyak dua kali sehari, yaitu pada pagi dan sore hari, dengan menggunakan selang yang telah terhubung ke jalur pasokan air yang berada di tepi lahan.

Penyiangan gulma dilakukan pada saat tanaman jagung berusia 14 HST, dengan tujuan agar saat proses penyiangan, tanaman jagung yang masih kecil tidak tertukar dengan gulma di sekitarnya. Kegiatan penyiangan ini dilakukan secara rutin sebanyak satu kali setiap minggu hingga tanaman jagung memasuki fase vegetatif maksimum. Selain itu, bentuk pemeliharaan lainnya yaitu dengan melakukan penyemprotan pestisida nabati yang terbuat dari campuran bahan dasar tembakau dan daun sirsak. Campuran bahan tersebut berfungsi untuk mengendalikan serangan hama ulat grayak yang menyerang tunas tanaman jagung.

3.4.6 Pengambilan Sampel Tanah

Pengambilan sampel tanah dilakukan setelah pemanenan jagung manis (65-75 hari setelah tanam). Pengambilan sampel tanah dilakukan pada 3 titik pada setiap petak dengan menggunakan bor tanah dan dikompositkan setiap perlakuan, kemudian dikering udarakan, dibersihkan dari sisa tanaman dan biochar, dan diayak hingga lolos ayakan 2 mm.

3.5 Variabel Pengamatan

3.5.1. Ketersediaan Cu dan Zn di dalam Tanah

Pengukuran Cu dan Zn tersedia di dalam tanah sesudah panen dilakukan dengan menggunakan metode DTPA (Lindsay dan Norvell, 1978). Pengekstrak DTPA pH 7,3 dapat melarutkan ion-ion logam dalam bentuk senyawa khelat. Pada pH 7,3 larutan DTPA memiliki daya khelat paling kuat untuk unsur mikro logam termasuk Cu dan Zn. Cu dan Zn diukur menggunakan alat AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*). Adapun ekstraksi Cu dan Zn pada tanah dilakukan dengan cara menimbang tanah sebanyak 10 g dan dimasukkan ke dalam botol kocok. Lalu pengekstrak DTPA ditambahkan sebanyak 20 ml. Setelah itu campuran tanah dan larutan pengekstrak dikocok selama 2 jam dengan kecepatan 750 rpm. Setelah itu suspensi tanah disentrifus selama 5 menit dengan kecepatan 3000 rpm dan disaring dengan kertas saring *Whatman* no. 42. Kemudian ekstrak tanah dimasukkan ke tabung reaksi dan diukur konsentrasi Cu dan Zn pada ekstrak tanah dengan AAS.

3.5.2 Variabel Pendukung

Variabel pendukung yang diamati dalam penelitian ini adalah analisis pH (H₂O) tanah menggunakan metode pH meter dengan elektrode gelas, analisis P-tersedia menggunakan metode Bray 1, dan analisis C-organik menggunakan metode Walkley and Black (Thom dan Utomo, 1991).

3.6 Analisis Data

Homogenitas ragam data akan diuji dengan uji Bartlett dan aditivitas data diuji dengan uji Tukey. Apabila kedua asumsi terpenuhi maka data akan dianalisis dengan Analisis Ragam dengan taraf 5% dan 1%. Jika berpengaruh nyata, hasil rata-rata setiap perlakuan kemudian akan diuji lanjut dengan uji BNJ (Beda Nyata Jujur) pada taraf nyata 5%. Kemudian dilakukan Analisis Regresi untuk mengetahui hubungan antara ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah dengan pH, C-organik dan P-tersedia tanah.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka simpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Pemberian kombinasi bahan amelioran (biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi maupun pupuk kandang sapi dan *bio-slurry*) menghasilkan ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah yang tidak berbeda nyata dengan perlakuan tanpa amelioran. Namun, kombinasi biochar sekam padi dan pupuk kandang sapi secara spesifik meningkatkan kandungan C-organik dan P-tersedia di dalam tanah.
2. Pemupukan dengan berbagai dosis pupuk N, P, dan K menghasilkan ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn di dalam tanah yang tidak berbeda nyata dengan perlakuan tanpa pemupukan N, P, dan K. Namun, pemupukan dosis tepat berpengaruh nyata meningkatkan ketersediaan P di dalam tanah dibandingkan tanpa pemupukan, ½ dosis rekomendasi dan 1 dosis rekomendasi.
3. Tidak terdapat pengaruh interaksi antara kombinasi bahan amelioran dengan pemupukan N, P, dan K terhadap ketersediaan unsur hara Cu dan Zn di dalam tanah. Namun, interaksi tersebut berpengaruh nyata meningkatkan pH tanah, di mana pH tertinggi dicapai pada perlakuan kombinasi satu dosis pemupukan N, P, dan K dengan pupuk kandang sapi dan *bio-slurry*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan penulis menyarankan agar dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah dan serapannya baik pada brangkas tanaman maupun biji jagung manis dengan pemberian kombinasi berbagai jenis bahan amelioran (biochar sekam padi, pupuk kandang sapi, dan *bio-slurry*) serta dosis pemupukan N, P, dan K.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriano, D. C. 2001. Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. *Springer-Verlag*.
- Adugna, G. 2016. A review on impact of compost on soil properties, water use and crop productivity. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*, 43: 93-104.
- Afrilia, S. 2024. Pengaruh Kombinasi Biochar dan Pupuk Kandang Sapi dengan Pemupukan NPK Terhadap Ketersediaan Unsur Hara Mikro Cu dan Zn di Dalam Tanah dan Serapannya pada Tanaman Jagung. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., dan Bird, M. I. 2016. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543: 295-306.
- Agusalim, M., Utomo, W.H., dan Syamsiyah, J. 2010. Pengaruh biochar terhadap ketersediaan unsur hara mikro pada tanah masam. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 34(2): 89-97.
- Akmal, A., dan Simanjuntak, B.H. 2019. Pengaruh pemberian biochar terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman sawi pakchoy (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*). *Jurnal Ilmu Pertanian*, 7(2): 168-174.
- Alloway, B. J. 2008. *Zinc in soils and crop nutrition*. International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association, Brussels.
- Alloway, B. J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5): 537-548.
- Apori, S. O., Byalebeka, J., Murongo, M., Ssekandi, J., dan Noel, G. L. 2021. Effect of co-applied corncob biochar with farmyard manure and NPK fertilizer on tropical soil. *Resources, Environment and Sustainability*, 5:1-8.

- Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk. 2023. *Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk* (Edisi ke-3). Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Barber, S. A. 1995. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. 2nd ed. John Wiley and Sons.
- Barik, K. C., dan Chandel, A. S. 2001. Effect of copper fertilization on plant growth, seed yield, copper and phosphorus uptake in soybean (*Glycine max*) and their residual availability in Mollisol. *Indian Journal of Agronomy*, 46(2): 319-326.
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., dan Lux, A. 2007. Zinc in plants. *New Phytologist*, 173(4): 677-702.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification. *Plant Soil*, 302(1): 1-17.
- Cakmak, I., dan Marschner, H. 1988. Increase in membrane permeability and exudation in roots of zinc deficient plants. *Journal of Plant Nutrition*, 11(6-11): 1109-1119.
- Cakmak, I., Pfeiffer, W. H., dan McClafferty, B. 2010. Biofortification of durum wheat with zinc and iron. *Cereal Chemistry*, 87(1): 10-20.
- Camp, A. F., dan Fudge, B. R. 1945. Zinc as a nutrient in plant growth. *Soil Science*, 60(3): 157-164.
- Chairunnisya, R. A., Hanum, H., dan Hidayat, B. 2017. Aplikasi bahan organik dan biochar untuk meningkatkan C-organik, P dan Zn tersedia pada tanah sawah: application of organic matter and biochar to increase organic carbon, p and zn available in paddy soil. *Jurnal Online Agroteknologi*, 5(3): 494-499.
- Chaudhary, F. R., dan Narwal, R. P. 2005. Effect of long-term application of farmyard manure on soil micronutrient availability. *Journal of Plant Nutrition*, 28(4): 651-663.
- Chen, X., Chen, G., Chen, L., Chen, Y., Lehmann, J., McBride, M. B., dan Hay, A. G. 2011. Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. *Bioresource Technology*, 102(20), 8877-8884.
- Chen, Y., Shinogi, Y., dan Taira, M. 2013. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. *Australian Journal of Soil Research*, 48(7): 526-530.

- Devi, N. W. B. S., Siaka, I. M., dan Putra, K. G. D. 2019. Spesiasi dan bioavailabilitas logam berat Cu dan Zn dalam tanah pertanian organik dan anorganik. *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*, 13(2): 213-220.
- Dobermann, A., dan Fairhurst, T. 2000. *Rice, Nutrient Disorders and Nutrient Management*. IRRI. Mekati City. The Philippines.
- Fageria, N. K. 2016. *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., dan Clark, R. B. 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77: 185-268.
- Fan, T. T., Wang, Y. J., Li, C. B., He, J. Z., Gao, J., Zhou, D. M., Friedman, S. P., dan Sparks, D. L. 2016. Effect of organic matter on sorption of Zn on soil: Elucidation by Wien effect measurements and EXAFS spectroscopy. *Environmental Science and Technology*, 50(6): 2931–2937.
- Feng, J., Burke, I.T., Chen, X., dan Stewart, D.I. 2024. Evolution of Cu and Zn speciation in agricultural soil amended by digested sludge over time. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(42): 54738–54752.
- Fischer, D., dan Glaser, B. 2012. *Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration*. In Kumar S. dan Bharti A. (Eds.). *Management of Organic Waste*. 167-198. *InTech*.
- Gibson, R. S. 2012. *Principles of Nutritional Assessment*. 2nd ed. Oxford University Press, New York.
- Hafeez, B., Khanif, Y. M., dan Saleem, M. 2013. Role of zinc in plant nutrition – A review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2): 374-391.
- Handayanto, E., Nurul, M., dan Amrullah, F. 2017. *Pengelolaan Kesuburan Tanah*. Universitas Brawijaya. Press.
- Hardjowigeno, S. 2003. *Ilmu Tanah*. Akademika Pressindo. Jakarta.
- Hartanto, Y., dan Christina, H. P. 2013. *Pedoman Penggunaan dan Pengawas Pengelolaan dan Pemanfaatan Bio-slurry*. Jakarta. (Edisi Revisi).
- Hartono, A., Utomo, W. H., dan Suharto, S. 2021. Karakteristik Beberapa Jenis Biochar dan Pengaruhnya Terhadap Sifat-Sifat Tanah dan Pertumbuhan Jagung. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 45(1): 23-32.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., dan Nelson, W. L. 2005. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (7th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., dan Nelson, W. L. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers (Sixth edition)*. New Jersey.

- Hodges, S. C. 2011. *Soil fertility basics*. NC Certified Crop Advisor Training. Soil Science Extension North Carolina State University.
- Joy, E. J. M., Broadley, M. R., Young, S. D., Black, C. R., Chilimba, A. D. C., Ander, E. L., Barlow, T. S., dan Watts, M. J. 2014. Soil type influences human selenium status and dietary selenium intake in Malawi. *Science of The Total Environment*, 476-477: 489-500.
- Juliati, S. 2008. Pengaruh pemberian Zn dan P terhadap bibit jeruk varietas Japanese citroen pada tanah inseptisol. *Jurnal Hortikultura*, 18(4):409-419.
- Jurinak, J. J., dan Bauer, N. 1956. Thermodynamics of zinc adsorption on calcite, dolomite and magnesite-type minerals. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20(4): 466-471.
- Kementrian Pertanian. 2020. *Rekomendasi Pupuk N, P, dan K Spesifik Lokasi untuk Tanaman Padi, Jagung, dan Kedelai pada Lahan Sawah (Per Kecamatan)*. Kementrian Pertanian. Jakarta.
- Komárek, M., Vaněk, A., dan Ettler, V. 2013. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides: A review. *Environmental Pollution*, 172: 9-22.
- Kusumawati, A. 2021. *Kesuburan Tanah dan Pemupukan*. Yogyakarta: Poltek. LPP Press
- Kutman, U. B., Yildiz, B., dan Cakmak, I. 2011. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant and Soil*, 342(1-2): 149-164.
- Lambers, H., Chapin, F. S., dan Pons, T. L. 2008. *Plant Physiological Ecology*. 2nd ed. Springer, New York.
- Laurent, C., Bravin, M. N., dan Lamy, I. 2020. Increased soil pH and dissolved organic matter after organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability. *Science of the Total Environment*, 7(20): 1-23.
- Lestari, T. 2023. Ketersediaan Unsur Hara Mikro Cu dan Zn di Dalam Tanah dan Serapannya oleh Tanaman Jagung Akibat Pemberian Berbagai Jenis Biochar dan Pupuk P. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Lindsay, W. L., dan Norvell, W. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3): 421-428.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. Academic Press, London.

- Masi, R., N.E. Dungga, dan C.W.B. Yanti. 2015. Peningkatan Kualitas Produksi Stroberi Melalui Pemanfaatan Bio-Slurry Cair. *J. Agrotan*, 1(1): 45-56.
- Mautuka, Z. A., Maifa, A., dan Karbeka, M. 2022. Pemanfaatan Biochar Tongkol Jagung Guna Perbaikan Sifat Kimia Tanah Lahan Kering. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(1): 473-480.
- McBride, M. B. 1994. *Environmental Chemistry Of Soils*. Oxford University Press.
- Moral, R., Moreno, J., Perez, M. D., Perez, A., Rufete, B., dan Paredes, C. 2005. Characterisation of the organic matter pool in manures. *Bioresource Technology*, 96(2): 153-158.
- Mortvedt, J. 1991. *Correcting iron deficiencies in annual and perennial plants: Present technologies and future prospects*. In: Chen, Y. dan Hadar, Y. (Eds.), *Iron nutrition and interactions in plants*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 315-321.
- Nguyen, T. N., Tahmasbian, R., Che, Z., Zhou, H., Wallace, M., dan Bai, S. H. 2017. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma*, 288: 79–96.
- Ouedraogo, F., Cornu, J. Y., Fanin, N., Janot, N., Sourzac, M., Parlanti, E., dan Denaix, L. 2024. Changes over time in organic matter dynamics and copper solubility in a vineyard soil after incorporation of cover crop residues: Insights from a batch experiment. *Chemosphere*, 350(2).12-20.
- Ozanne, P. G. 1955. The effect of nitrogen on zinc deficiency in subterranean clover. *Australian Journal of Agricultural Research*, 6(5): 667-680.
- Pilon, M., Abdel-Ghany, S. E., Cohu, C. M., Gogolin, K. A., dan Ye, H. 2006. Copper cofactor delivery in plant cells. *Kusukusum*, 9(3): 256-263.
- Prasetyo, B. H., dan Suriadikarta, D. A. 2006. Karakteristik, Potensi, Dan Teknologi Pengelolaan Tanah Ultisol Untuk Pengembangan Pertanian Lahan Kering di Indonesia. *Litbang Pertanian*, 2(25). 1-39.
- Rehman, A., Farooq, M., Ozturk, L., Asif, M., & Siddique, K.H.M. 2018. Zinc nutrition in rice and wheat: A review. *Plant and Soil*, 424(1-2): 1-29.
- Rengel, Z., dan Basra, A. S. (Ed.). 1999. *Mineral Nutrition of Crops: Fundamental Mechanisms and Implications*. Food Products Press, New York.
- Rengel, Z. 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2): 397-409.

- Saidy, A. R. dan Badruzsauhari, B. 2009. Pengaruh jenis dan dosis bahan organik terhadap karakteristik kimia tanah Ultisols. *Jurnal Tanah Tropika*, 14(2): 171-180.
- Salawati, S., Amin, M., dan Yulianti, R. 2022. Peran mikroorganisme tanah dalam mineralisasi bahan organik pada lahan padi. *Jurnal Biologi Tanah*, 10(2): 89-97.
- Saleem, M. H., Usman, K., Rizwan, M., Al Jabri, H., dan Alsafran, M. 2022. Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Journal Frontiers in Plant Science*, 13(1):1-13.
- Sarief, E. S. 1986. *Kesuburan dan Pemupukan Tanah Pertanian*. Pustaka Buana. Bandung.
- Sari, R. R., Nurbaity, A., dan Sudirja, R. 2017. Peran asam organik dalam meningkatkan ketersediaan Zn pada tanah masam. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 41(1): 33-40.
- Schulz, H. dan Glaser, B. 2012. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(3): 410-422.
- Selim, H. M. dan Amacher., M. C.1997. *Reactivity and Transport of Heavy Metals in Soils*. CRC, Boca Raton.
- Sibagariang, N. A., Bertham, Y. H., Widiyono, H., Anandyawati., dan Utami K. 2022. The Effect of Humic Acid and Micro Compound Fertilizer on Soil Microorganism Population and Upland Rice Yield in Coastal Land. *Journal of Land Restoration*, 5(2): 58-64.
- Simarmata, T., Setiawati, M. R., Silfani, Y., dan Kamaluddin, N. 2020. Aplikasi pupuk urea, pupuk hayati penambat nitrogen dan amelioran untuk meningkatkan pH, C-organik, populasi bakteri penambat nitrogen dan hasil jagung pada Inceptisols. *SoilRens*, 18(2): 1-10.
- Sinclair, S. A., dan Krämer, U. 2012. The zinc homeostat: a growing family of transporters. *Plant Physiology*, 159(3): 984-988.
- Singh, M. V., Patel, K. P., dan Ramani, V. P. 2005. *Crop responses to secondary and micronutrients in swell-shrink soils*. Management of Swell-Shrink Soils. Indian Society of Soil Science.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E. dan Bol, R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105: 47-82.
- Sparks, D. L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. 2nd ed. Academic Press, San Diego.

- Sparks, D. L., Page, A. L., Helanke, P. A., dan Loeppert, R. H. 1995. *Chemical Processes in Soils*. SSA Book Series. Soil Science Society of America.
- Stevenson, F. J. 1994. *Organic Forms of Soil Nitrogen*. In: *Stevenson, F.J., Ed., Humic Chemistry: Genesis, Composition, Reaction* Wiley, New York.
- Supriatin, S., dan Salam, A. K. 2024. Total and extractable micronutrients in tropical acid soils of Lampung, Indonesia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(17): 2529–2544.
- Thom, W. O., dan Utomo, M. 1991. *Manajemen laboratorium dan metode analisis tanah dan tanaman*. Universitas Lampung. Bandar Lampung, 85.
- White, P. J., dan Broadley, M. R. 2011. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(3): 324-330.
- Wiriyanta, W., dan Bernardinus, T. 2002. *Bertanam Cabai Pada Musim Hujan*. Agromedia Pustaka, Jakarta
- Yruela, I. 2005. Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1): 145-156.
- Yuniarti, A., dan Kaya, E. 2015. Efek kombinasi pupuk organik padat granul dan pupuk N, P, K terhadap Zn total, Zn tersedia, serapan Zn, serta hasil padi sawah pada Inceptisols. *Jurnal Budidaya Pertanian*, 11(1), 1–6.
- Yuniarti, A., Solihin, E., dan Putri, A.T.A. 2020. Aplikasi pupuk organik dan N, P, K terhadap pH tanah, P-tersedia, serapan P, dan hasil padi hitam (*Oryza sativa* L.) pada inceptisol. *Jurnal Kultivasi*, 19(1): 1040-1046.