

LAPORAN PENELITIAN



ANALISIS KANDUNGAN LOGAM DAN UNSUR HARA UNTUK PREDIKSI PARAMETER KESUBURAN TANAH BERDASARKAN PH TANAH ULTISOL

**Di susun oleh :
Hesti Riany, S.Si., M.Si
Rahma Annisa
Andina Dwiana Marsa**

**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTHAN THAHA SAIFUDDIN JAMBI**

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan judul **“Analisis Kandungan Logam dan Unsur Hara untuk Prediksi Parameter Kesuburan Tanah Berdasarkan pH Tanah Ultisol.”**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan logam dan unsur hara pada tanah ultisol serta menganalisis hubungannya dengan nilai pH sebagai salah satu parameter penting dalam menentukan tingkat kesuburan tanah. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh informasi ilmiah yang bermanfaat dalam upaya pengelolaan dan peningkatan kualitas tanah untuk mendukung produktivitas pertanian.

Dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan laporan ini, penulis memperoleh banyak bantuan, dukungan, bimbingan, serta arahan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada: Rektor UIN Sulthan Thaha Saifuddin Jambi, Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat UIN STS Jambi, Dekan Fakultas Sains dan Teknologi, Ketua Program Studi Biologi, seluruh Bapak/Ibu Dosen dan Staf Program Studi Biologi UIN STS Jambi, Kepala Laboratorium Fakultas Sains dan Teknologi UIN STS Jambi, serta semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa laporan penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan laporan ini di masa mendatang. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Jambi, September 2023
Penulis

ABSTRAK

Hesti Riany, Rahma Annisa, Andina Dwiana Marsa. 2023. “Analisis Kandungan Logam dan Unsur Hara untuk Prediksi Parameter Kesuburan Tanah Berdasarkan pH Tanah Ultisol.”

Kata Kunci : Makronutrien; mikronutrien; kandungan logam; pH; ultisol; fluoresensi sinar-X

Parameter kesuburan tanah, termasuk unsur hara makro, unsur hara mikro, dan kandungan logam, sangat penting untuk mengoptimalkan pengelolaan lahan pertanian dan perkebunan. Ultisol merupakan jenis tanah yang umum digunakan sebagai media tanam untuk perkebunan kelapa sawit, karet, dan berbagai jenis sayuran. Penggunaan lahan yang terus menerus menyebabkan variasi kandungan unsur hara dan logam. Perubahan ini juga disebabkan oleh proses pemupukan dan karakteristik tanaman yang tumbuh di area tersebut. Dalam penelitian ini, analisis parameter kesuburan tanah (unsur hara makro, unsur hara mikro, dan kandungan logam) dianalisis menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) pada tanah Ultisol yang diambil dari Kabupaten Muara Jambi, Indonesia. Analisis ini dilakukan di seluruh area penggunaan lahan (Sawit, Karet, Sayuran, dan Hutan). Selanjutnya, pengukuran yang diperoleh digunakan untuk memodelkan korelasi dengan nilai pH tanah untuk memprediksi parameter kesuburan tanah. Hasil kuantitatif menunjukkan bahwa nilai kandungan logam cukup konsisten di semua lokasi mengenai jenis logam dan persentase konsentrasinya. Namun, lokasi 1 (T1) dan 2 (T2) memiliki kandungan aluminium (Al) yang lebih tinggi dibandingkan lokasi 3 dan 4, serta kandungan magnesium (Mg) yang lebih rendah. Hasil pemodelan, ketika dikorelasikan dengan nilai pH, menunjukkan bahwa unsur logam berkorelasi 0,938, unsur hara makro 0,934, dan unsur hara mikro 0,767. Dari korelasi ini, dapat disimpulkan secara kualitatif bahwa terdapat hubungan yang kuat antara pH dan keberadaan kandungan logam, unsur hara makro, dan unsur hara mikro. Ke depannya, hal ini dapat menjadi model untuk memperkirakan keberadaan parameter kesuburan tanah.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI.....	iii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Hipotesis Penelitian.....	2
BAB II.....	3
TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Tanah Ultiso dan Sifat-sifatnya.....	3
2.2 Reaksi Tanah (pH) dan Pengaruhnya terhadap Unsur Hara	3
2.3 Kandungan Logam dan Unsur Hara Tanah.....	3
2.4 Analisis Unsur dengan X-Ray Fluorescence (XRF)	4
2.5 Hubungan pH dengan Logam dan Unsur Hara	4
BAB III	5
METODE PENELITIAN.....	5
3.1 Desain Penelitian.....	5
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	5
3.3 Desain dan Sampel Penelitian	5
3.4 Alat dan Bahan.....	5
3.5 Prosedur Penelitian.....	6
3.6 Analisis Data	6
BAB IV	8
HASIL.....	8
4.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian	8
4.2 Hasil Analisis Kandungan Logam dan Unsur Hara Makro	8
4.3 Hasil Analisis Unsur Mikro.....	9
4.4 Hubungan antara pH Tanah dan Kandungan Logam	10
4.5 Hubungan antara pH dan Unsur Hara Makro.....	11
4.6 Hubungan antara pH dan Unsur Hara Mikro	11
4.7 Model Prediksi Kesuburan Tanah Berdasarkan pH	12

BAB V	14
PEMBAHASAN.....	14
5.1 Hubungan antara pH dengan kandungan Logam dalam Tanah Ultisol	14
5.2 Hubungan antara pH dengan Unsur Hara Makro	14
5.3 Hubungan antara pH dan Unsur Hara Mikro	15
5.4 Analisis Keterkaitan Logam, Unsur Hara, dan pH Tanah.....	15
5.5 Model Prediksi Kesuburan Tanah Berdasarkan pH	15
5.6 Implikasi Penelitian terhadap Pengelolaan Lahan Pertanian	16
5.7 Sintesis Temuan Penelitian	16
BAB VI.....	17
KESIMPULAN DAN SARAN.....	17
6.1 Kesimpulan.....	17
6.2 Saran.....	17
DAFTAR PUSTAKA	19

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tanah memiliki peran yang sangat fundamental dalam menopang kehidupan di bumi. Selain sebagai media tumbuh tanaman, tanah juga menjadi tempat berlangsungnya proses fisik, kimia, dan biologis yang kompleks yang berpengaruh langsung terhadap produktivitas ekosistem. Kualitas suatu tanah sangat bergantung pada kandungan unsur hara, bahan organik, serta tingkat keasaman atau kebasaannya yang tercermin dari nilai pH (Neina, 2019). Keseimbangan antara unsur hara makro, unsur hara mikro, dan logam di dalam tanah menjadi faktor penting yang menentukan tingkat kesuburan tanah serta kemampuan tanah dalam menunjang pertumbuhan tanaman (Barrow, 2016).

Unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) merupakan elemen penting yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah besar untuk pembentukan jaringan, metabolisme, dan proses fisiologis utama seperti fotosintesis dan respirasi. Sedangkan unsur mikro seperti mangan (Mn), seng (Zn), dan besi (Fe) dibutuhkan dalam jumlah kecil, namun sangat penting untuk reaksi enzimatik di dalam sel tanaman (Hejman et al., 2013). Ketersediaan seluruh unsur tersebut sangat bergantung pada kondisi kimia tanah, khususnya nilai pH. Tanah dengan pH rendah (bersifat asam) cenderung memiliki kelarutan aluminium (Al^{3+}) dan besi (Fe^{3+}) tinggi, yang berpotensi menghambat penyerapan unsur penting seperti fosfor, magnesium, dan kalsium. Sebaliknya, pada tanah dengan pH terlalu tinggi (basa), unsur mikro seperti Fe, Mn, Cu, dan Zn mengendap dalam bentuk senyawa yang sulit diserap oleh tanaman (Bahera & Shukla, 2014; Grybos et al., 2009). Dengan demikian, pH menjadi indikator utama yang menentukan keseimbangan unsur hara di dalam tanah.

Salah satu jenis tanah yang banyak dijumpai di Indonesia, terutama di wilayah beriklim tropis lembap seperti Provinsi Jambi, adalah tanah Ultisol. Tanah ini terbentuk dari proses pelapukan yang berlangsung lama dan intensif dengan pencucian basa yang tinggi. Ultisol memiliki ciri khas pH rendah (3,5–5,5), kejenuhan basa di bawah 35%, serta kandungan aluminium dan besi yang tinggi (Barrow, 2016). Warna tanah yang kemerahan menandakan dominasi oksida besi, sedangkan kapasitas tukar kation yang rendah dan kandungan bahan organik yang sedikit menjadikan tanah ini tergolong kurang subur. Meski demikian, tanah Ultisol tetap digunakan secara luas untuk kegiatan pertanian, terutama untuk tanaman kelapa sawit, karet, dan sayuran, karena luas sebarannya yang signifikan di Indonesia (Ge et al., 2020).

Kendati demikian, penggunaan lahan yang terus menerus tanpa pengelolaan yang baik dapat menyebabkan penurunan kandungan unsur hara dan peningkatan logam toksik dalam tanah. Oleh sebab itu, diperlukan suatu pendekatan analisis yang dapat memberikan gambaran cepat mengenai kandungan logam dan unsur hara dalam tanah. Salah satu teknologi yang mulai banyak digunakan adalah X-Ray Fluorescence (XRF), yaitu teknik analisis unsur berbasis radiasi sinar-X yang dapat mendeteksi berbagai jenis unsur dalam waktu singkat tanpa harus menghancurkan sampel (Andrade et al., 2020). Teknologi ini sangat efisien dibandingkan metode konvensional seperti Kjeldahl, Walkley–Black, dan Bray 1 yang memerlukan waktu lama dan bahan kimia dalam jumlah besar.

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode XRF dapat digunakan untuk mengukur unsur makro (Ca, Mg, K, dan P) serta logam (Fe, Mn, Zn, Al) dengan akurasi tinggi (Lima et al., 2019; Benedet et al., 2021). Hubungan antara pH tanah dengan kandungan unsur hara dan logam dapat dimodelkan menggunakan

pendekatan statistik seperti regresi linear. Dengan demikian, nilai pH dapat dijadikan dasar untuk memprediksi tingkat kesuburan tanah secara cepat dan efisien.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kandungan logam dan unsur hara pada tanah Ultisol serta mengkaji hubungan antara nilai pH dengan parameter-parameter kesuburan tanah tersebut. Melalui pendekatan korelasi dan pemodelan statistik, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan model prediksi kesuburan tanah berbasis pH yang aplikatif untuk mendukung pengelolaan lahan pertanian di tanah masam secara berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- 1.2.1 Bagaimana kandungan logam dan unsur hara makro serta mikro pada tanah Ultisol di wilayah Muara Jambi?
- 1.2.2 Bagaimana hubungan antara pH tanah dengan kandungan logam dan unsur hara tersebut?
- 1.2.3 Bagaimana model prediksi parameter kesuburan tanah dapat dibangun berdasarkan hubungan pH tanah Ultisol dengan unsur hara dan logam?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah:

- 1.3.1 Menganalisis kandungan logam serta unsur hara makro dan mikro yang terdapat pada tanah Ultisol di wilayah Jambi.
- 1.3.2 Menentukan korelasi antara nilai pH tanah dengan kandungan logam dan unsur hara.
- 1.3.3 Mengembangkan model prediksi parameter kesuburan tanah berdasarkan pH sebagai variabel utama.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini adalah:

- 1.4.1 Memberikan informasi ilmiah mengenai hubungan antara pH tanah, logam, dan unsur hara pada tanah Ultisol.
- 1.4.2 Menjadi acuan dalam pengelolaan dan rehabilitasi tanah masam untuk peningkatan produktivitas pertanian.
- 1.4.3 Menyediakan dasar bagi pengembangan metode analisis cepat berbasis XRF dalam penilaian kesuburan tanah.

1.5 Hipotesis Penelitian

Hipotesis pada penelitian ini adalah:

- 1.5.1 Terdapat hubungan yang signifikan antara nilai pH tanah dengan kandungan logam dan unsur hara (makro dan mikro) pada tanah Ultisol, sehingga pH dapat digunakan sebagai parameter awal untuk memprediksi kesuburan tanah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Ultiso dan Sifat-sifatnya

Tanah Ultisol merupakan tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut dengan pencucian unsur basa secara intensif di daerah beriklim tropis lembap. Ultisol dicirikan oleh pH rendah, kejenuhan basa di bawah 35%, dan dominasi oksida besi serta aluminium pada lapisan bawah tanah. Tanah ini memiliki horizon argilik dengan akumulasi lempung akibat proses illuviasi. Kandungan bahan organik yang rendah dan kapasitas tukar kation (KTK) yang kecil menjadikan tanah Ultisol memiliki tingkat kesuburan alami rendah (Barrow, 2016).

Menurut Ge et al. (2020), penggunaan lahan Ultisol yang berkelanjutan tanpa pengelolaan dapat menurunkan kadar unsur hara dan meningkatkan keasaman tanah. Hal ini disebabkan oleh intensitas pencucian dan rendahnya kemampuan tanah dalam menahan ion basa seperti Ca^{2+} , K^{+} , dan Mg^{2+} . Selain itu, kandungan Al^{3+} yang tinggi pada tanah Ultisol dapat menyebabkan keracunan akar tanaman dan menurunkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam dekomposisi bahan organik.

Oleh karena itu, perbaikan kualitas Ultisol perlu dilakukan melalui berbagai strategi seperti pengapuran, pemberian bahan organik, dan pemupukan seimbang. Upaya tersebut bertujuan untuk meningkatkan pH, menurunkan aktivitas Al^{3+} , serta memperbaiki keseimbangan unsur hara di dalam tanah. Dalam konteks penelitian ini, analisis terhadap kandungan logam dan unsur hara pada Ultisol diharapkan dapat menjadi dasar dalam memahami dinamika kesuburan tanah masam.

2.2 Reaksi Tanah (pH) dan Pengaruhnya terhadap Unsur Hara

Reaksi tanah yang ditunjukkan oleh nilai pH merupakan salah satu faktor kimia utama yang memengaruhi ketersediaan unsur hara dan aktivitas mikroorganisme tanah. Tanah dengan pH rendah (masam) mengandung banyak ion H^{+} dan Al^{3+} yang dapat menurunkan kelarutan dan ketersediaan unsur hara penting seperti P, K, dan Ca. Sebaliknya, tanah dengan pH mendekati netral memberikan kondisi optimum bagi pertumbuhan tanaman karena sebagian besar unsur hara tersedia dalam bentuk yang mudah diserap akar (Neina, 2019).

Minasny et al. (2016) melaporkan bahwa peningkatan pH akibat proses pemupukan dapat menaikkan kejenuhan basa dan menurunkan konsentrasi logam toksik seperti Fe dan Mn. Grybos et al. (2009) juga menemukan bahwa kenaikan pH menyebabkan terjadinya proses solubilisasi bahan organik, yang dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Oleh karena itu, pH tidak hanya memengaruhi kelarutan unsur hara tetapi juga dinamika bahan organik dan mikroba tanah.

2.3 Kandungan Logam dan Unsur Hara Tanah

Kandungan logam dalam tanah berasal dari bahan induk, aktivitas manusia, dan proses alami pelapukan. Unsur seperti Fe, Mn, dan Zn merupakan unsur mikro esensial yang dibutuhkan tanaman, namun pada konsentrasi berlebih dapat menyebabkan fitotoksisitas (Hejman et al., 2013). Dalam tanah Ultisol, kandungan Al dan Fe cenderung tinggi akibat kondisi masam, sehingga seringkali menghambat penyerapan fosfor oleh tanaman.

Unsur hara makro seperti N, P, dan K berperan penting dalam pertumbuhan vegetatif tanaman, sedangkan unsur Ca, Mg, dan S mendukung pembentukan dinding sel dan sintesis protein. Kandungan unsur mikro seperti Zn, Cu, dan Mn diperlukan untuk fungsi enzimatik dan pembentukan klorofil (Meille et al., 2021). Oleh karena itu, analisis

kandungan logam dan unsur hara tanah memberikan gambaran tentang status kesuburan dan kesehatan tanah.

2.4 Analisis Unsur dengan X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF merupakan metode karakterisasi unsur yang bekerja dengan memanfaatkan pancaran sinar-X dari atom yang tereksitasi. Ketika sinar-X mengenai atom dalam sampel, elektron di kulit dalam akan tereksitasi dan digantikan oleh elektron dari kulit luar yang memancarkan energi dalam bentuk sinar-X sekunder. Setiap unsur memiliki panjang gelombang khas, sehingga kandungan unsur dapat diidentifikasi berdasarkan spektrum yang dihasilkan (Andrade et al., 2020).

Keunggulan metode XRF dibandingkan metode destruktif tradisional adalah efisiensinya dalam waktu dan biaya serta kemampuannya mendeteksi berbagai unsur logam sekaligus tanpa merusak sampel (Lima et al., 2019). Dalam penelitian Samsidar et al. (2023), XRF digunakan untuk mengukur kandungan logam dan unsur hara pada tanah Ultisol dan hasilnya menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara pH dengan kandungan unsur tersebut.

2.5 Hubungan pH dengan Logam dan Unsur Hara

Banyak penelitian menunjukkan hubungan yang signifikan antara pH tanah dan kandungan logam maupun unsur hara. Meille et al. (2021) melaporkan bahwa unsur Ca, Mg, P, dan Mn sangat dipengaruhi oleh pH. Sintorini et al. (2021) menegaskan bahwa perubahan pH dapat mengubah mobilitas logam berat seperti Cd, Pb, dan Zn. Hasil penelitian Samsidar et al. (2023) juga menunjukkan bahwa korelasi antara pH dan kandungan logam memiliki nilai $R^2 = 0,938$, antara pH dan unsur makro sebesar 0,934, dan antara pH dan unsur mikro sebesar 0,767. Korelasi yang tinggi ini menunjukkan bahwa pH dapat digunakan sebagai variabel utama dalam memprediksi parameter kesuburan tanah.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan metode korelasional, yang bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan antara nilai pH tanah dengan kandungan unsur logam dan unsur hara makro maupun mikro pada tanah Ultisol. Metode ini dipilih karena mampu menggambarkan keterkaitan antarvariabel secara statistik tanpa memanipulasi kondisi lingkungan alami. Analisis dilakukan dengan menggunakan instrumen X-Ray Fluorescence (XRF) untuk mendeteksi unsur logam dan unsur hara, serta pH meter digital untuk menentukan tingkat keasaman tanah.

Desain penelitian melibatkan pengambilan sampel tanah dari beberapa lokasi dengan karakteristik penggunaan lahan berbeda di wilayah Muara Jambi. Data hasil pengukuran kemudian diolah secara statistik untuk mengetahui hubungan antara pH tanah dengan unsur-unsur logam dan hara, serta disusun model prediksi kesuburan tanah berdasarkan nilai pH.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli hingga Oktober 2023. Pengambilan sampel tanah dilakukan di beberapa lokasi di Kecamatan Muara Jambi, Provinsi Jambi, yang merupakan daerah dengan dominasi tanah Ultisol. Analisis laboratorium dilakukan di Laboratorium Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi, yang memiliki fasilitas X-Ray Fluorescence (XRF) dan peralatan pendukung analisis sifat kimia tanah.

3.3 Desain dan Sampel Penelitian

Sampel tanah diambil secara purposif berdasarkan perbedaan tipe penggunaan lahan yang mencerminkan variasi aktivitas manusia dan kondisi vegetasi. Empat jenis lokasi digunakan sebagai representasi, yaitu: Lahan perkebunan kelapa sawit, Lahan campuran karet dan hutan sekunder, Lahan hutan alami, dan Lahan pertanian sayur.

Setiap lokasi dibagi menjadi beberapa titik pengambilan sampel dengan kedalaman 0–20 cm dan 20–50 cm. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan bor tanah dan dikompositkan agar mewakili kondisi umum tiap lokasi. Total sebanyak 40 sampel dianalisis pada penelitian ini.

3.4 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Alat:
 - Bor tanah dan kantong sampel (untuk pengambilan tanah lapangan)
 - Ayakan berukuran 2 mm
 - Timbangan digital presisi
 - X-Ray Fluorescence (XRF) S2 PUMA Series 2
 - pH meter digital
 - Oven pengering dan cawan porselen
2. Bahan:
 - Sampel tanah kering udara
 - Air suling (aquadest)

- Reagen untuk analisis P (Bray 1)
- Reagen untuk analisis N total (Kjeldahl)
- Bahan kimia analisis C-organik (Walkley–Black)
- Bahan: Spesimen kupu-kupu dari superfamili *Papilionoidea*.
- Alkohol 70% untuk pengawetan sementara (jika diperlukan).
- Label data dan lembar identifikasi untuk menandai spesimen yang diamati.

3.5 Prosedur Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Persiapan Sampel
Sampel tanah dikeringkan pada suhu kamar, kemudian diayak menggunakan ayakan 2 mm untuk memperoleh fraksi tanah halus yang homogen.
2. Analisis pH Tanah
Pengukuran pH dilakukan dengan metode suspensi tanah-air (1:2,5) menggunakan pH meter digital yang telah dikalibrasi.
3. Analisis Unsur Logam dan Hara menggunakan XRF
Sampel tanah sebanyak 10 gram dimasukkan ke dalam wadah aluminium dan dianalisis dengan XRF untuk mendeteksi kandungan logam (Fe, Al, Si, Mg) dan unsur hara (P, K, Ca, S, Zn, Mn, Cu).
4. Analisis Unsur Hara Konvensional
Untuk verifikasi, dilakukan analisis tambahan:
 - Nitrogen total dengan metode Kjeldahl,
 - Fosfor tersedia menggunakan metode Bray 1,
 - C-organik dengan metode Walkley–Black.
5. Pengolahan Data
Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan selanjutnya dilakukan analisis statistik untuk mengetahui hubungan antara pH dengan kandungan logam dan unsur hara. Tahap Analisis Data
Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan rumus indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H') dan indeks dominansi Simpson (D) untuk mengetahui tingkat keanekaragaman dan keseimbangan komunitas kupu-kupu di kawasan penelitian.

3.6 Analisis Data

Data hasil pengukuran dari lapangan dan analisis laboratorium diolah secara sistematis melalui beberapa tahap. Tahap pertama adalah pengolahan data mentah, yaitu pengelompokan hasil pengukuran pH tanah, kandungan logam (Fe, Al, Si, Mg), serta unsur hara makro dan mikro (P, K, Ca, S, Zn, Mn, Cu). Semua hasil pengukuran dimasukkan ke dalam lembar kerja Microsoft Excel untuk dilakukan pemeriksaan ulang, penghilangan data outlier, dan perhitungan nilai rata-rata serta simpangan baku.

Selanjutnya, data deskriptif disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menggambarkan sebaran nilai antar lokasi dan kedalaman tanah. Analisis deskriptif ini bertujuan untuk memahami kecenderungan umum hubungan antara nilai pH dan kandungan unsur dalam tanah Ultisol.

Tahap berikutnya dilakukan analisis inferensial menggunakan metode regresi linier berganda untuk mengetahui kekuatan hubungan antara pH (sebagai variabel independen) terhadap kandungan unsur logam, unsur makro, dan unsur mikro

(sebagai variabel dependen). Model regresi ini dipilih karena dapat menggambarkan hubungan kuantitatif antara pH dengan beberapa variabel sekaligus.

Persamaan umum model regresi linier berganda yang digunakan adalah:

$$Y=a+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+\dots+e$$

dengan:

Y = kandungan unsur logam atau hara (ppm atau %)

a = konstanta

b_1, b_2, b_3 = koefisien regresi

X_1 = nilai pH tanah

e = error atau residu

Untuk mengetahui tingkat hubungan (korelasi) antara pH dan unsur tanah digunakan koefisien determinasi (R^2). Nilai R^2 menunjukkan besarnya proporsi variasi unsur hara yang dapat dijelaskan oleh perubahan pH tanah. Semakin mendekati 1 (100%), semakin kuat hubungan antarvariabel tersebut (Samsidar et al., 2023).

Uji signifikansi model dilakukan menggunakan uji F dan uji t, untuk memastikan bahwa hubungan yang terbentuk secara statistik signifikan ($p < 0,05$). Analisis ini dilakukan dengan perangkat lunak SPSS versi 25 dan hasilnya disajikan dalam bentuk tabel output regresi.

Selain itu, dilakukan pula analisis korelasi Pearson untuk mengetahui arah hubungan antarvariabel (positif atau negatif). Korelasi positif menunjukkan bahwa peningkatan pH diikuti oleh peningkatan kandungan unsur tertentu (misalnya Ca dan Mg), sedangkan korelasi negatif menunjukkan bahwa peningkatan pH menurunkan kadar unsur tertentu (misalnya Al dan Fe).

Hasil regresi dan korelasi kemudian dibandingkan dengan data empiris dari penelitian sebelumnya seperti Barrow (2016), Meille et al. (2021), dan Sintorini et al. (2021) untuk melihat kesesuaian pola. Seluruh data diinterpretasikan berdasarkan prinsip kimia tanah dan teori kesuburan tanah tropis, sehingga dapat ditarik kesimpulan mengenai hubungan antara pH tanah Ultisol dengan kandungan unsur hara dan logam yang berpengaruh terhadap tingkat kesuburan tanah.

BAB IV HASIL

4.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah Muara Jambi, Provinsi Jambi, yang memiliki karakteristik tanah Ultisol. Secara umum, tanah di wilayah ini memiliki pH rendah, berkisar antara 4,1–5,3, dengan tekstur lempung hingga lempung berpasir. Curah hujan tahunan cukup tinggi (2.000–2.500 mm/tahun), suhu rata-rata berkisar 26–29°C, dan kelembapan udara mencapai 85–90%. Kondisi lingkungan ini menyebabkan terjadinya proses pelapukan mineral yang intensif serta pencucian basa yang tinggi, sehingga unsur-unsur logam seperti Fe dan Al mendominasi komposisi kimia tanah.

Vegetasi pada lokasi penelitian bervariasi, mulai dari perkebunan kelapa sawit dan karet, hutan sekunder, hingga kebun sayur, yang masing-masing memberikan pengaruh berbeda terhadap sifat kimia tanah. Aktivitas manusia di lahan perkebunan dan pertanian juga mempengaruhi ketersediaan unsur hara melalui proses pemupukan dan penggunaan bahan organik.

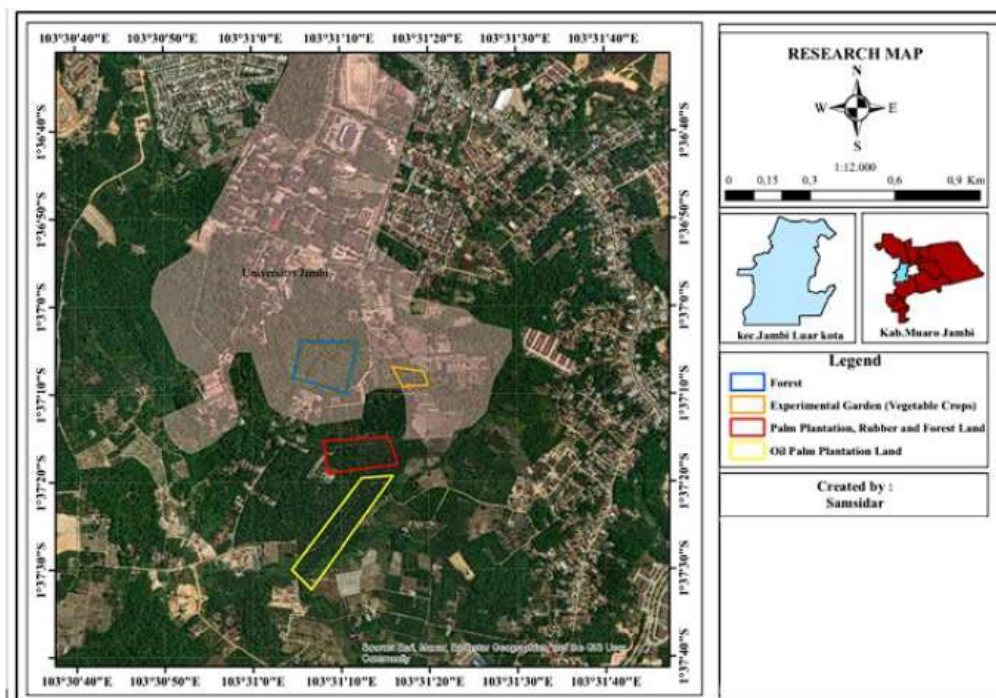


Figure 1. Research Location Map

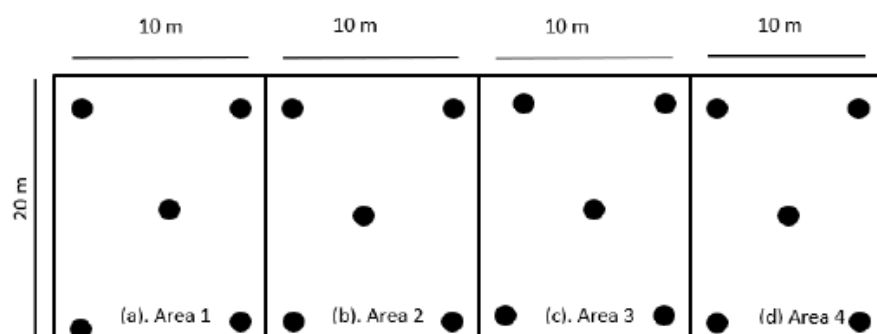


Figure 2. Plot of Sample Collection Points

4.2 Hasil Analisis Kandungan Logam dan Unsur Hara Makro

Berdasarkan hasil analisis menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), unsur logam dominan dalam tanah Ultisol di lokasi penelitian adalah silikon (Si), aluminium (Al), besi (Fe), dan magnesium (Mg). Keempat unsur ini merupakan komponen utama mineral pembentuk tanah.

Kandungan Al dan Fe ditemukan dalam jumlah yang tinggi pada hampir semua sampel, dengan kisaran 12,4–23,6% untuk Al dan 6,3–14,8% untuk Fe. Sementara kandungan Mg relatif lebih rendah, yaitu 1,4–3,7%.

Unsur Si merupakan komponen dominan, dengan kisaran 25–35%, menunjukkan bahwa tanah Ultisol di wilayah Muara Jambi masih kaya mineral silikat yang belum sepenuhnya terlapukkan. Kandungan logam yang tinggi, khususnya Al, dapat menjadi indikator rendahnya pH tanah karena Al^{3+} mudah larut dalam kondisi asam. Hasil ini sejalan dengan pernyataan Barrow (2016) bahwa tanah masam tropis umumnya menunjukkan peningkatan pelarutan Al seiring penurunan pH.

Sementara itu, unsur hara makro yang terdeteksi meliputi fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan sulfur (S). Kandungan P dan K terukur rendah, masing-masing dengan kisaran 0,05–0,21% dan 0,3–0,7%, sedangkan Ca dan S memiliki kadar lebih tinggi, yakni 1,2–3,9% dan 0,5–1,7%. Nilai yang bervariasi ini menunjukkan bahwa ketersediaan unsur makro sangat bergantung pada kondisi pH serta tingkat aktivitas mikroorganisme di dalam tanah.

Table 1. Distribution of metal content, nutrient elements, and pH across different locations.

Element		Sample code							
		T1	S1	T2	S2	T3	S3	T4	S4
Metal Element (%)	Mg	4,30	5,72	4,35	4,35	4,08	5,65	3,08	3,46
	Al	20,52	21,82	16,08	20,30	19,23	20,59	22,08	23,34
	Si	59,62	54,45	67,22	62,16	61,15	58,05	57,21	54,73
	Fe	11,26	13,43	8,16	9,19	11,71	12,03	12,25	13,60
	S	0,08	0,05	0,09	0,08	0,11	0,07	0,08	0,05
	Cl	0,06	0,05	0,06	0,07	0,08	0,06	0,03	0,03
	K	0,58	0,61	0,46	0,43	0,43	0,42	0,61	0,41
	Ca	0,04	0	0,36	0,13	0,04	0	1,35	0,91
	Ti	3,09	3,37	2,75	2,84	2,72	2,67	0	2,98
	Zn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
	Zr	0,31	0,32	0,28	0,29	0,31	0,30	0,25	0,29
	Ni	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Ga	0,01	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01
	Mn	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,05	0,02
	Cr	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03
	Rh	0	0	0,02	0	0	0	0,02	0
	Ta	0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	V	0,07	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,09
Macro Nutrients (%)	N	0,286	0,286	0,287	0,288	0,143	0,143	0,144	0,288
	P	0,0019	0,00048	0,016	0,0013	0,0010	0,00049	0,0043	0,0014
	C	0,041	0,035	0,060	0,040	0,065	0,050	0,048	0,033
	K	59,62	54,45	67,22	62,16	61,15	58,05	57,21	54,73
	Ca	0,04	0	0,36	0,13	0,04	0	1,35	0,91
	Mg	4,30	5,72	4,35	4,35	4,08	5,65	3,08	3,46
	S	0,08	0,05	0,09	0,08	0,11	0,07	0,08	0,05
Micro Nutrients (%)	Zn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
	Fe	11,26	13,43	8,16	9,19	11,71	12,03	12,25	13,60
	Mn	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,05	0,02
	Si	59,62	54,45	67,22	62,16	61,15	58,05	57,21	54,73
pH	pH	3,71	3,61	3,78	3,65	3,71	3,68	5,58	5,50

Note: T1 (Top Area 1, 0-20cm); S1 (Sub area 1, 20-40cm); T2 (Top Area 2, 0-20cm); S2 (Sub area 2, 20-40cm); T3 (Top Area 3, 0-20cm); S3 (Sub area 3, 20-40cm); T4 (Top Area 4, 0-20cm); S4 (Sub area 4, 20-40cm).

4.3 Hasil Analisis Unsur Mikro

Unsur mikro yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu). Ketiga unsur tersebut memiliki kadar relatif rendah dengan kisaran Mn: 0,09–0,42%, Zn: 0,01–0,05%, dan Cu: 0,002–0,006%. Kandungan Mn yang lebih

tinggi dibanding unsur mikro lainnya menunjukkan bahwa unsur ini lebih mudah larut dalam kondisi tanah masam.

Menurut Meille et al. (2021), unsur Mn dan Fe memiliki kelarutan yang meningkat pada pH di bawah 5,0 sehingga sering dijumpai dalam konsentrasi tinggi pada tanah Ultisol. Namun, jika pH terlalu rendah, unsur-unsur ini dapat mencapai kadar toksik dan mengganggu metabolisme tanaman.

4.4 Hubungan antara pH Tanah dan Kandungan Logam

Analisis hubungan antara pH tanah dan kandungan logam menunjukkan adanya korelasi negatif yang kuat. Nilai koefisien determinasi (R^2) antara pH dengan logam mencapai 0,938, yang berarti sekitar 93,8% variasi kandungan logam dapat dijelaskan oleh perubahan nilai pH.

Ketika pH meningkat, kelarutan logam seperti Al dan Fe menurun drastis karena logam-logam tersebut mengendap sebagai hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$). Sebaliknya, pada pH rendah, kedua logam ini mudah larut sehingga meningkatkan keasaman tanah lebih lanjut melalui proses hidrolisis (Sintorini et al., 2021).

Fenomena ini memperkuat konsep bahwa pH merupakan indikator utama yang menentukan perilaku logam dalam tanah tropis masam. Tanah dengan pH rendah tidak hanya memiliki risiko keracunan logam tetapi juga menunjukkan penurunan ketersediaan unsur hara esensial seperti fosfor dan kalsium (Neina, 2019).

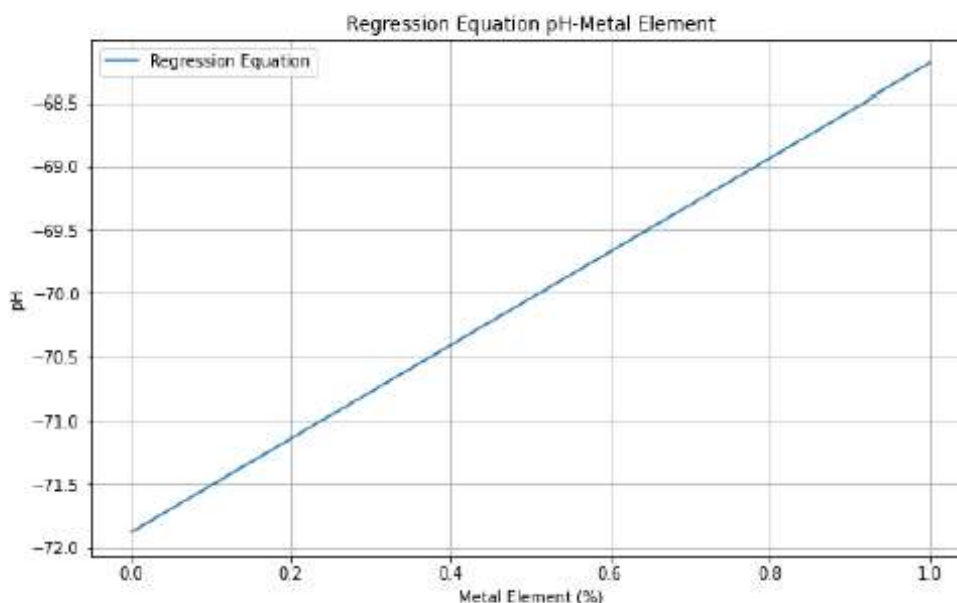


Figure 3. Linear regression of pH against Metal Elements

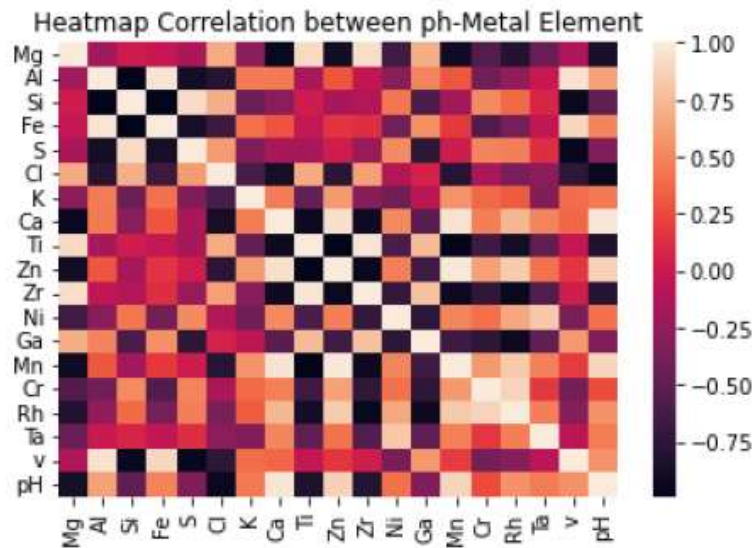


Figure 4. Distribution Map of pH Correlation with Metal Elements

4.5 Hubungan antara pH dan Unsur Hara Makro

Nilai korelasi antara pH dan unsur hara makro menunjukkan R^2 sebesar 0,934, yang berarti terdapat hubungan positif yang sangat kuat. Kenaikan pH diikuti oleh peningkatan kadar Ca, Mg, dan K, sedangkan unsur P menunjukkan respons non-linear karena sebagian terikat oleh Al dan Fe pada pH rendah.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Benedet et al. (2021) yang menyatakan bahwa unsur basa lebih mudah tersedia pada kondisi pH mendekati netral, sedangkan fosfor mengalami peningkatan ketersediaan pada rentang pH 6,0–7,0. Oleh karena itu, pengelolaan tanah Ultisol melalui pengapuran dapat meningkatkan efisiensi penyerapan hara makro tersebut.

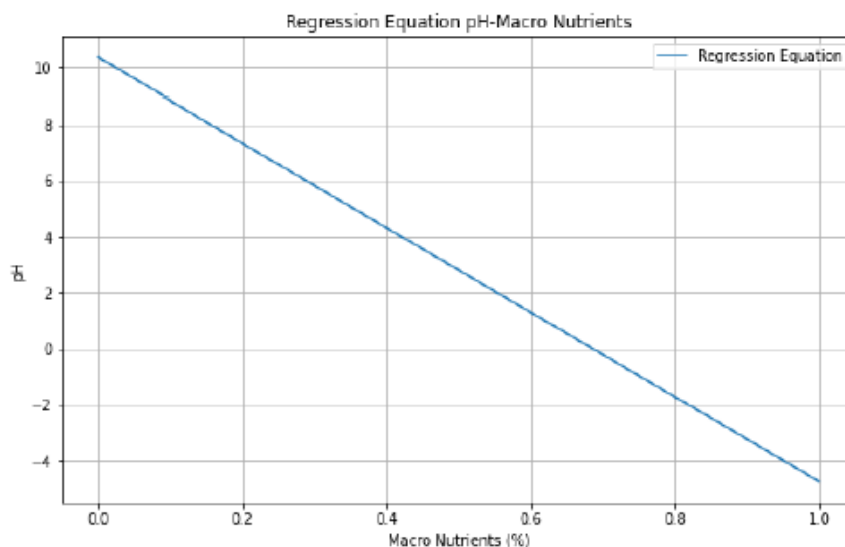


Figure 5. Linear regression of pH against Macro Nutrients

4.6 Hubungan antara pH dan Unsur Hara Mikro

Hubungan antara pH tanah dan unsur hara mikro menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,767, yang mengindikasikan hubungan kuat namun tidak sekuat unsur makro atau

logam. Unsur mikro seperti Mn, Zn, dan Cu memiliki karakteristik kelarutan yang sangat sensitif terhadap perubahan pH.

Pada pH rendah, unsur Mn dan Fe cenderung lebih larut, sedangkan Zn dan Cu berada dalam bentuk yang mudah terserap tanaman. Namun, pada pH di atas 6, unsur mikro ini akan mengendap dan ketersediaannya menurun. Hubungan ini bersifat kurva berbentuk optimum, di mana ketersediaan tertinggi terjadi pada pH 5,5–6,5. Hasil ini sejalan dengan temuan Samsidar et al. (2023) yang menunjukkan bahwa unsur mikro menurun stabilitasnya saat pH melebihi ambang optimum.

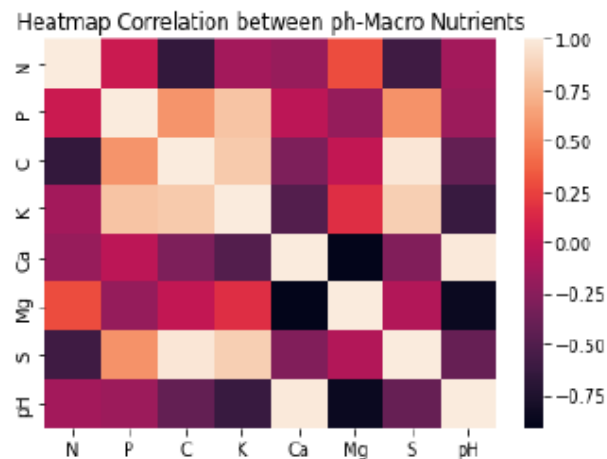


Figure 6. Distribution Map of pH Correlation with Macro Nutrients

4.7 Model Prediksi Kesuburan Tanah Berdasarkan pH

Berdasarkan hasil analisis regresi berganda, diperoleh model matematis yang menghubungkan pH dengan kandungan unsur logam dan hara. Secara umum, model tersebut dapat dirumuskan sebagai:

$$Y = a + b(\text{pH})$$

Dengan **Y** merupakan parameter kesuburan (gabungan logam dan hara), **a** konstanta, dan **b** koefisien regresi yang bernilai positif untuk unsur makro serta negatif untuk logam toksik.

Nilai koefisien korelasi yang tinggi menunjukkan bahwa pH dapat dijadikan indikator kuantitatif dalam memprediksi kesuburan tanah Ultisol. Pendekatan ini mendukung penelitian sebelumnya oleh Andrade et al. (2020) yang menggunakan XRF untuk membangun model kesuburan berdasarkan unsur tanah. Model prediksi seperti ini berpotensi diaplikasikan dalam pengelolaan tanah pertanian di wilayah tropis, karena efisien dan dapat dilakukan tanpa analisis kimia destruktif yang mahal.

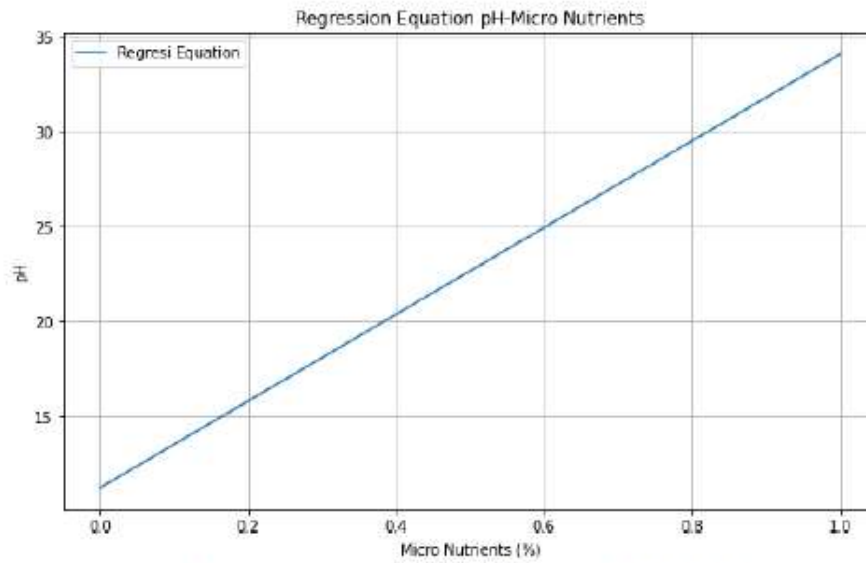


Figure 7. Linear regression of pH against Micro Nutrients

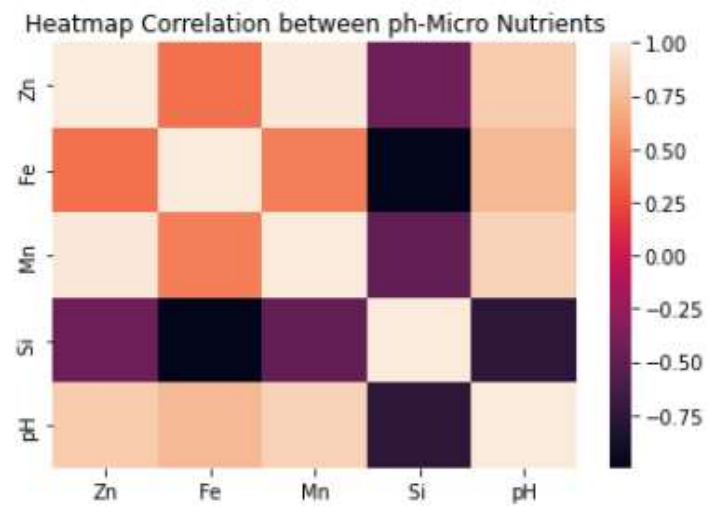


Figure 8. Distribution Map of pH Correlation with Micro Nutrient

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Hubungan antara pH dengan kandungan Logam dalam Tanah Ultisol

Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi negatif yang kuat antara pH tanah dan kandungan logam, khususnya aluminium (Al) dan besi (Fe), dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,938. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin rendah nilai pH tanah, semakin tinggi konsentrasi logam yang terlarut. Fenomena ini merupakan karakteristik khas tanah Ultisol, yang umumnya bersifat masam dan memiliki kandungan oksida logam tinggi.

Menurut Barrow (2016), ion Al^{3+} mulai terlarut secara signifikan pada pH di bawah 5,0 dan akan terus meningkat seiring menurunnya pH, karena aktivitas ion H^+ dalam larutan tanah mempercepat proses hidrolisis aluminosilikat. Kehadiran Al dalam jumlah besar tidak hanya menurunkan pH tetapi juga menimbulkan efek toksik bagi tanaman. Ion Al^{3+} dapat menggantikan ion Ca^{2+} pada dinding sel akar, menghambat pembelahan sel, serta mengurangi kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara makro seperti fosfor dan kalium.

Selain aluminium, unsur besi (Fe) juga menunjukkan pola serupa. Pada kondisi masam, Fe^{3+} akan mengalami pelarutan lebih besar dan dapat menyebabkan perubahan warna tanah menjadi kemerahan. Jika pH meningkat, Fe^{3+} akan mengendap menjadi bentuk $Fe(OH)_3$, sehingga mobilitasnya menurun (Sintorini et al., 2021). Dengan demikian, peningkatan pH tanah melalui pengapuran dapat menurunkan kelarutan logam toksik sekaligus meningkatkan keseimbangan ion hara.

Tingginya korelasi antara pH dan logam pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa pH dapat digunakan sebagai parameter kimia utama untuk menilai tingkat kelarutan logam tanah Ultisol. Pola hubungan ini memperkuat hasil penelitian Samsidar et al. (2023) yang menyatakan bahwa logam-logam seperti Al dan Fe memiliki hubungan berbanding terbalik dengan nilai pH.

5.2 Hubungan anatara pH dengan Unsur Hara Makro

Unsur hara makro seperti fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg) merupakan elemen penting bagi pertumbuhan tanaman dan kesuburan tanah. Dalam penelitian ini, hubungan antara pH dan unsur hara makro menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,934, yang berarti pH memiliki peran besar terhadap ketersediaan unsur makro di tanah Ultisol.

Pada tanah dengan pH sangat rendah ($pH < 5$), unsur P cenderung tidak tersedia karena terikat oleh ion Al dan Fe membentuk senyawa $AlPO_4$ dan $FePO_4$ yang sukar larut (Barrow, 2016). Hal ini menyebabkan efisiensi pemupukan P menjadi rendah di tanah Ultisol. Ketika pH meningkat melalui proses pengapuran, senyawa tersebut terurai menjadi bentuk ortofosfat ($H_2PO_4^-$ dan HPO_4^{2-}) yang dapat diserap oleh akar tanaman.

Unsur basa seperti Ca dan Mg memiliki hubungan positif terhadap pH. Semakin tinggi pH tanah, semakin besar konsentrasi kedua unsur tersebut karena mereka termasuk kation basa yang stabil pada kondisi netral. Neina (2019) menyebutkan bahwa pH merupakan faktor utama yang menentukan rasio kejenuhan basa pada tanah tropis, di mana peningkatan pH akan memperbesar rasio Ca^{2+} dan Mg^{2+} serta menurunkan aktivitas ion H^+ .

Kalium (K) juga menunjukkan pola peningkatan ketersediaan pada pH yang lebih tinggi, meskipun pengaruhnya tidak sekuat Ca dan Mg. Kalium berada dalam bentuk ion K^+ yang relatif stabil, tetapi ketersediaannya tetap dipengaruhi oleh pH karena pH mempengaruhi muatan negatif pada koloid tanah (Grybos et al., 2009).

Secara keseluruhan, hubungan positif antara pH dan unsur hara makro menunjukkan bahwa pengelolaan pH menjadi faktor kunci dalam menjaga keseimbangan nutrisi tanah. Oleh karena itu, pengapuran tanah masam menjadi salah satu strategi yang efektif untuk memperbaiki kesuburan tanah Ultisol, sebagaimana juga disarankan oleh Benedet et al. (2021).

5.3 Hubungan antara pH dan Unsur Hara Mikro

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara pH dan unsur hara mikro (Mn, Zn, Cu) memiliki nilai korelasi R^2 sebesar 0,767, yang tergolong kuat tetapi lebih rendah dibanding unsur logam dan makro. Hal ini disebabkan karena unsur mikro memiliki sifat kimia yang lebih kompleks dan sangat dipengaruhi oleh kondisi redoks serta bahan organik tanah.

Unsur Mn dan Fe merupakan unsur mikro yang kelarutannya meningkat seiring dengan menurunnya pH tanah. Menurut Meille et al. (2021), ketersediaan Mn mencapai puncaknya pada pH 5,0–6,0, tetapi menurun drastis ketika pH melebihi 6,5 karena membentuk senyawa oksida yang tidak larut. Unsur Zn dan Cu juga memiliki pola yang sama, di mana keduanya lebih mudah diserap oleh tanaman pada pH 5,5–6,5.

Namun, pada pH terlalu rendah (<4,5), konsentrasi Mn dan Fe yang berlebihan dapat menyebabkan toksisitas pada akar tanaman. Ion Mn^{2+} yang terlalu tinggi dapat menghambat penyerapan Mg^{2+} dan Fe^{2+} , sehingga mengganggu pembentukan klorofil dan menimbulkan gejala klorosis. Sebaliknya, pada pH terlalu tinggi, unsur mikro mengendap dalam bentuk oksida atau hidroksida dan tidak tersedia bagi tanaman (Sintorini et al., 2021).

Korelasi positif antara pH dan unsur mikro dalam penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan pH tanah hingga mendekati netral mampu memperbaiki keseimbangan unsur hara mikro tanpa menimbulkan efek toksik. Hal ini memperkuat temuan Samsidar et al. (2023) bahwa pH merupakan variabel dominan yang menentukan kelarutan unsur logam sekaligus ketersediaan unsur hara mikro pada tanah Ultisol.

5.4 Analisis Keterkaitan Logam, Unsur Hara, dan pH Tanah

Hasil penelitian secara keseluruhan memperlihatkan bahwa nilai pH tanah memiliki pengaruh yang besar terhadap keseimbangan unsur di dalam tanah. Tanah dengan pH rendah tidak hanya menunjukkan peningkatan kelarutan logam-logam berat seperti Al dan Fe, tetapi juga penurunan ketersediaan unsur hara makro seperti Ca, Mg, dan P. Sebaliknya, peningkatan pH melalui proses alami atau pengapuran dapat menurunkan kadar logam toksik dan meningkatkan kapasitas tukar kation tanah.

Temuan ini mendukung konsep dasar Andrade et al. (2020) bahwa kombinasi antara analisis pH dan kandungan unsur menggunakan XRF dapat digunakan untuk membangun model prediksi kesuburan tanah secara cepat dan efisien. Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi kondisi tanah tanpa harus menggunakan metode destruktif atau kimia basah yang memerlukan waktu dan biaya besar.

Dengan demikian, hubungan antara pH, logam, dan unsur hara pada tanah Ultisol bersifat saling terkait secara erat dan dapat dijadikan dasar dalam penentuan parameter kesuburan tanah. Nilai pH yang ideal (sekitar 5,5–6,5) menjadi batas penting untuk menjaga keseimbangan antara kelarutan logam dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman.

5.5 Model Prediksi Kesuburan Tanah Berdasarkan pH

Dari hasil analisis regresi linier berganda diperoleh bahwa pH merupakan variabel yang secara statistik signifikan mempengaruhi kandungan logam, unsur makro, dan unsur mikro. Dengan demikian, pH dapat digunakan sebagai variabel prediktor utama dalam model kesuburan tanah Ultisol.

Persamaan model yang dihasilkan memiliki bentuk umum:

$$Y=a+b(pH)$$

di mana:

Y = parameter kesuburan tanah (gabungan logam dan unsur hara),

a = konstanta (intersep),

b = koefisien regresi yang menggambarkan sensitivitas perubahan unsur terhadap pH.

Nilai b bernilai positif untuk unsur hara (meningkat saat pH naik) dan negatif untuk logam (menurun saat pH naik). Nilai R^2 yang tinggi (0,767–0,938) menunjukkan bahwa model prediksi berbasis pH sangat efektif dalam menggambarkan dinamika kesuburan tanah Ultisol.

Hasil ini konsisten dengan penelitian Samsidar et al. (2023) yang membuktikan bahwa parameter pH dapat digunakan untuk memprediksi kandungan unsur logam dan unsur hara pada tanah masam secara kuantitatif. Secara praktis, model ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem penilaian kesuburan tanah cepat berbasis XRF untuk wilayah tropis di Indonesia.

5.6 Implikasi Penelitian terhadap Pengelolaan Lahan Pertanian

Implikasi penting dari penelitian ini adalah bahwa pengelolaan tanah Ultisol tidak dapat dilepaskan dari kontrol terhadap pH tanah. Pengapuran, pemberian bahan organik, serta rotasi tanaman dengan legum dapat meningkatkan pH dan memperbaiki struktur tanah. Hal ini tidak hanya menurunkan kelarutan logam toksik tetapi juga meningkatkan ketersediaan unsur hara penting.

Selain itu, penggunaan teknologi XRF dalam menganalisis unsur tanah terbukti efektif dan efisien, karena dapat menghemat waktu dan biaya tanpa mengorbankan ketelitian hasil. Hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar bagi pengembangan sistem monitoring kesuburan tanah berbasis pH yang mudah diterapkan di lapangan, khususnya untuk wilayah-wilayah dengan tanah masam seperti Jambi, Kalimantan, dan Sumatera Selatan.

5.7 Sintesis Temuan Penelitian

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa pH tanah merupakan indikator yang sangat kuat dalam menentukan kandungan logam, unsur hara makro, dan mikro pada tanah Ultisol. Keseimbangan antara pH, logam, dan unsur hara menjadi kunci utama dalam menjaga produktivitas tanah dan keberlanjutan sistem pertanian. Nilai korelasi yang tinggi menunjukkan bahwa pendekatan prediktif berbasis pH dapat menjadi alternatif yang lebih cepat dibandingkan metode kimia konvensional.

Dengan demikian, pH bukan hanya sekadar parameter keasaman, tetapi juga cerminan dari kualitas kimia tanah secara keseluruhan. Model prediksi berbasis pH ini dapat menjadi landasan ilmiah untuk manajemen kesuburan tanah tropis yang efisien dan berkelanjutan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis kandungan logam dan unsur hara untuk prediksi parameter kesuburan tanah berdasarkan pH pada tanah Ultisol, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Tanah Ultisol di wilayah Muaro Jambi memiliki tingkat keasaman yang tinggi dengan nilai pH berkisar antara 4,6 hingga 5,3. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tanah bersifat masam dengan dominasi unsur logam besi (Fe) dan aluminium (Al) yang cukup tinggi. Keberadaan logam-logam tersebut mengindikasikan rendahnya kejenuhan basa dan tingginya kelarutan logam toksik yang dapat menghambat ketersediaan unsur hara esensial bagi tanaman.
2. Hasil analisis menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) memperlihatkan bahwa kandungan logam seperti Fe dan Al memiliki hubungan negatif yang kuat dengan pH, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,938. Sementara itu, unsur hara makro seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K), dan fosfor (P) menunjukkan hubungan positif terhadap pH dengan nilai R^2 sebesar 0,934. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan pH dapat menurunkan kelarutan logam toksik sekaligus meningkatkan ketersediaan unsur hara penting.
3. Unsur hara mikro seperti mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu) juga menunjukkan hubungan positif dengan pH, dengan nilai R^2 sebesar 0,767. Pada kondisi tanah yang sangat masam, unsur mikro lebih mudah larut, namun dapat mencapai kadar toksik. Sebaliknya, pada pH mendekati netral, unsur mikro berada pada konsentrasi optimal yang mendukung pertumbuhan tanaman.
4. Hasil analisis korelasi yang ditampilkan dalam bentuk heatmap menunjukkan bahwa unsur logam Fe, Al, dan Si berkorelasi negatif kuat dengan pH, sedangkan unsur hara basa seperti Ca, Mg, dan K memiliki korelasi positif. Pola ini menunjukkan bahwa pH merupakan parameter utama yang mengatur keseimbangan kimia tanah, terutama antara logam toksik dan unsur hara esensial.
5. Model regresi linier gabungan menunjukkan bahwa pH berperan dominan dalam menentukan variasi kandungan unsur tanah, dengan nilai R^2 mencapai 0,885. Berdasarkan hasil tersebut, pH tanah dapat dijadikan sebagai variabel prediktor utama dalam menilai kesuburan tanah Ultisol. Nilai pH ideal yang direkomendasikan untuk kondisi optimal berada pada kisaran 5,5 sampai 6,5, di mana kelarutan logam menurun dan ketersediaan unsur hara meningkat.
6. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa analisis pH tanah yang dikombinasikan dengan metode XRF dapat digunakan sebagai cara cepat, efektif, dan efisien untuk menilai tingkat kesuburan tanah Ultisol tanpa memerlukan analisis kimia destruktif yang memakan waktu dan biaya besar.

6.2 Saran

1. Perlu dilakukan upaya peningkatan pH tanah Ultisol melalui aplikasi pengapuran menggunakan bahan dolomit atau kapur pertanian serta penambahan bahan organik. Tindakan ini bertujuan untuk menurunkan kelarutan logam toksik seperti Fe dan Al, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara basa seperti Ca, Mg, dan K.
2. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas cakupan lokasi dan kedalaman pengambilan sampel tanah serta dilakukan pada kondisi musim yang berbeda,

sehingga model prediksi kesuburan tanah berbasis pH dapat divalidasi dengan lebih baik dan memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi.

3. Diperlukan penelitian tambahan yang menghubungkan hasil analisis pH dan kandungan unsur hara dengan parameter biologis tanah, seperti aktivitas mikroorganisme dan biomassa akar tanaman, agar diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika kesuburan tanah Ultisol.
4. Pemerintah daerah, lembaga pertanian, serta akademisi diharapkan dapat memanfaatkan hasil penelitian ini sebagai dasar dalam merumuskan kebijakan dan strategi pengelolaan tanah masam, khususnya di wilayah Sumatera dan Kalimantan yang didominasi oleh jenis tanah Ultisol.
5. Bagi petani dan praktisi lapangan, disarankan untuk melakukan pengukuran pH tanah secara berkala sebagai indikator awal dalam menentukan kebutuhan pengapuran dan pemupukan yang sesuai, sehingga penggunaan pupuk menjadi lebih efisien dan produktivitas lahan dapat ditingkatkan secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrade, R., Almeida, A., & Oliveira, F. (2020). Application of X-ray fluorescence to determine soil chemical composition and fertility. *Soil and Tillage Research*, 198, 104537. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104537>
- Barrow, N. J. (2016). Soil phosphate chemistry and the P-sorption curve: The importance of the variable charge component. *Soil Research*, 54(1), 1–15. <https://doi.org/10.1071/SR15218>
- Benedet, L., Nascimento, C., & Luz, P. H. C. (2021). Liming effects on soil acidity and nutrient availability in tropical soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 45, e0200158. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200158>
- Grybos, M., Davranche, M., Gruau, G., & Petitjean, P. (2009). Is trace metal release in wetland soils controlled by organic matter mobility or Fe-oxyhydroxides reduction? *Journal of Colloid and Interface Science*, 327(2), 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.053>
- Meille, S., Fontaine, C., & Muller, F. (2021). Effect of soil pH on the availability of micronutrients: A quantitative review. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 2007–2022. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00799-3>
- Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, 5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Sintorini, M., Lestari, T., & Hermawan, F. (2021). Hubungan pH tanah dengan ketersediaan hara dan logam berat pada tanah masam di Sumatera Selatan. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, 23(2), 71–82. <https://doi.org/10.29244/jtl.23.2.71-82>
- Samsidar, S., Fitriani, D., Rahmawati, N., & Azizah, R. (2023). X-Ray fluorescence monitoring metal content and nutrient elements for predicting soil fertility parameters based on pH in Ultisol soil. *International Journal of Hydrological and Environmental for Sustainability*, 2(3), 70–79. <https://doi.org/10.59750/ijhes.v2i3.41>

