

KARAKTERISASI SIFAT KIMIA TANAH DAN PENENTUAN KEBUTUHAN KAPUR PADA LAHAN MARGINAL UNTUK MENDUKUNG PRODUKTIVITAS TANAMAN JAGUNG

Hanim Rahayuani Ratnaningsih^{1*}, Joko Maryanto², Simbar Sulanjari Susanto³, Taufik Walinono⁴, Prasmadji Sulistyanto⁵

^{1,2,3,4,5} Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman

*Corresponding author:hanim.rahayuani@unsoed.ac.id.

INFO ARTIKEL	ABSTRACT/ABSTRAK
Diterima : 05-05-2026 Direvisi : 08-06-2026 Dipublikasi: 24-07-2026 <i>Keywords: exchangeable aluminum, corn, soil acidity, marginal land, liming, cation exchange capacity</i> Kata kunci: aluminium dapat ditukar, jagung, kemasaman tanah, lahan marginal, pengapuran, kapasitas tukar kation	Characterization of Soil Chemical Properties and Determination of Lime Requirements on Marginal Land to Support Corn Productivity <i>Marginal lands are characterized by limited soil chemical properties, particularly high acidity, which results in low nutrient availability and increased aluminum toxicity. This study aims to analyze soil chemical properties and determine lime requirements as an effort to improve soil fertility in marginal lands in Banyumas, Central Java. The research was conducted using a survey method with purposive sampling at depths of 0–20 cm and 20–40 cm. Soil parameters analyzed included pH, exchangeable aluminum (Al-dd), and exchangeable hydrogen (H-dd). The results showed that the soil is classified as acidic with a pH range of 4.78–5.00, exchangeable aluminum (Al-dd) content of 0.86–1.04 cmol(+)/kg, and exchangeable hydrogen (H-dd) of 3.22–4.20 cmol(+)/kg, indicating high soil acidity and potential aluminum toxicity. These conditions lead to a decrease in nutrient availability, particularly phosphorus, and inhibit plant root growth. The relationship between pH and exchangeable Al indicates a trend where lower soil pH leads to higher aluminum solubility. Based on the analysis, a lime requirement of 470 - 531kg/ha is recommended to increase soil pH, suppress aluminum activity, and improve nutrient availability. Thus, liming based on soil chemical analysis is an effective strategy for managing marginal lands to support sustainable maize productivity.</i> Lahan marginal memiliki keterbatasan sifat kimia tanah, terutama kemasaman tinggi yang berdampak pada rendahnya ketersediaan hara dan meningkatnya toksisitas aluminium. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat kimia tanah serta menentukan kebutuhan kapur sebagai upaya perbaikan kesuburan tanah pada lahan marginal di Banyumas, Jawa Tengah. Penelitian dilakukan dengan metode survei melalui pengambilan sampel tanah secara purposive sampling pada kedalaman 0–20 cm dan 20–40 cm, kemudian dianalisis parameter pH tanah, aluminium dapat ditukar (Al-dd), dan hidrogen dapat ditukar (H-dd). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah tergolong masam dengan pH 4,78–5,00, kandungan Al-dd sebesar 0,86–1,04 cmol(+)/kg, dan H-dd sebesar 3,22–4,20 cmol(+)/kg, yang mengindikasikan tingginya kemasaman tanah dan potensi toksisitas aluminium. Kondisi ini menyebabkan penurunan ketersediaan unsur hara, khususnya fosfor, serta menghambat pertumbuhan akar tanaman. Hubungan antara pH dan Al-dd menunjukkan kecenderungan bahwa semakin rendah pH tanah, semakin tinggi kelarutan aluminium. Berdasarkan analisis, kebutuhan kapur sebesar 470 - 531kg/ha direkomendasikan untuk meningkatkan pH tanah, menekan aktivitas aluminium, dan memperbaiki ketersediaan hara. Dengan demikian, pengapuran berbasis analisis sifat kimia tanah menjadi strategi efektif dalam pengelolaan lahan marginal untuk mendukung produktivitas tanaman jagung secara berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Lahan marginal didefinisikan sebagai lahan yang memiliki keterbatasan alami, baik dari aspek fisik, kimia, maupun biologi, yang secara akumulatif menyebabkan rendahnya potensi produktivitas tanaman jika dikelola tanpa input tambahan yang signifikan. Di Indonesia, luas lahan marginal terus meningkat seiring dengan degradasi lahan produktif dan konversi lahan subur untuk kepentingan non-pertanian (Putri et al., 2024). Pemanfaatan lahan ini menjadi sangat penting dalam rangka menjaga

ketahanan pangan nasional dengan segala kendala yang dihadapi. Salah satu kendala utama yang sering ditemukan pada lahan marginal di wilayah tropis adalah tingkat kemasaman tanah yang ekstrem. Fenomena ini bukan hanya nilai angka pada skala pH, melainkan cerminan dari ketidakseimbangan kimiawi yang menghambat siklus hara dan pertumbuhan tanaman.

Karakteristik utama lahan marginal masam berdampak langsung pada rendahnya ketersediaan unsur hara esensial seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg).

Kondisi ini memicu peningkatan toksisitas logam berat, terutama aluminium (Al) dan mangan (Mn). Di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi seperti Jawa Tengah, proses pencucian kation basa (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) terjadi secara intensif dan terus-menerus. Akibatnya, posisi kation basa pada kompleks pertukaran tanah digantikan oleh ion hidrogen (H^+) dan aluminium (Al^{3+}). Dominasi kedua ion ini dalam larutan tanah menjadi penyebab utama rendahnya kualitas kimia tanah (Zhang et al., 2023; Tiecher et al., 2022).

Kemasaman tanah memainkan peran utama sebagai indikator ketersediaan hara dan aktivitas biologis di dalam tanah. Tanah dengan nilai pH rendah memiliki tingkat kejenuhan aluminium yang tinggi. Secara fisiologis, aluminium dalam bentuk Al^{3+} bersifat toksik bagi jaringan tanaman. Ion ini masuk ke dalam sel akar dan menghambat pembelahan sel pada jaringan meristem apikal, yang pada akhirnya menyebabkan sistem perakaran menjadi pendek, membengkok, dan tidak mampu menembus lapisan tanah yang lebih dalam (Kochian et al., 2015). Kerusakan akar ini secara langsung menurunkan efisiensi serapan air dan hara, sehingga tanaman menjadi sangat rentan terhadap cekaman kekeringan dan defisiensi nutrisi meskipun pupuk telah diaplikasikan.

Selain itu, masalah kimiawi pada tanah masam juga berkaitan erat dengan fenomena fiksasi unsur fosfor (P). Fosfor merupakan unsur vital untuk pembentukan energi (ATP) dan perkembangan akar. Namun, pada kondisi tanah dengan pH rendah, ion fosfat cenderung bereaksi dengan aluminium dan besi (Fe) membentuk senyawa kompleks yang tidak larut dan tidak tersedia bagi tanaman (Havlin et al., 2016). Kondisi ini menyebabkan aplikasi pupuk P seringkali menjadi tidak efisien karena sebagian besar hara tersebut justru terikat kuat oleh mineral tanah dan tidak dapat diserap oleh bulu-bulu akar. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai parameter kimia seperti pH tanah, aluminium dapat ditukar (Al-dd), dan hidrogen dapat ditukar (H-dd) menjadi langkah awal yang bersifat sangat penting untuk merumuskan strategi pengelolaan lahan marginal yang tepat sasaran.

Sebagai upaya mitigasi terhadap kendala tersebut, pendekatan yang paling umum dan teruji secara ilmiah untuk memperbaiki kondisi tanah masam adalah melalui teknik pengapuran. Aplikasi kapur pertanian (seperti kalsit atau dolomit) berfungsi untuk meningkatkan pH tanah melalui proses netralisasi ion H^+ oleh gugus hidroksil (OH^-) yang dihasilkan dari reaksi kapur dengan air tanah. Selain menaikkan pH, pengapuran juga berperan penting dalam menetralkan aktivitas ion Al^{3+} , sehingga mengubahnya menjadi bentuk hidroksida yang tidak beracun bagi tanaman. Secara bersamaan, kapur meningkatkan kejenuhan basa dan menyediakan nutrisi tambahan berupa kalsium dan

magnesium yang sangat dibutuhkan dalam proses fisiologis tanaman (Ganti et al., 2023).

Peningkatan nilai pH melalui pengapuran dianggap sebagai strategi utama untuk memperbaiki kualitas tanah secara menyeluruh (Prihantoro et al., 2023). Dengan pH yang lebih netral, kelarutan aluminium dapat ditekan hingga ke level yang tidak membahayakan, sementara ketersediaan fosfor yang sebelumnya terikat akan meningkat secara bertahap. Berbagai penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa pengapuran yang dikelola dengan baik dapat meningkatkan produktivitas tanaman pangan secara signifikan di berbagai jenis agroekosistem (Enesi et al., 2023; Thi et al., 2023). Namun, tantangan teknis di lapangan adalah menentukan dosis kapur yang tepat. Pemberian kapur yang terlalu sedikit tidak akan memberikan dampak perbaikan yang nyata, sedangkan pemberian yang berlebihan justru dapat memicu defisiensi hara mikro dan memperbesar biaya produksi. Oleh karena itu, rekomendasi dosis harus didasarkan pada analisis laboratorium yang akurat terhadap kapasitas tukar kation dan kandungan aluminium tanah.

Penelitian ini dilaksanakan di Desa Kedungrandu, Kecamatan Patikraja, Kabupaten Banyumas. Wilayah ini secara geografis memiliki karakteristik lahan suboptimal dengan tingkat kesuburan yang rendah dan reaksi tanah yang sangat masam. Kondisi ini menjadi hambatan nyata bagi petani setempat, terutama dalam upaya meningkatkan hasil panen jagung yang merupakan komoditas unggulan nasional. Jagung dikenal sebagai tanaman yang cukup sensitif terhadap keracunan aluminium.

Penelitian ini dirancang untuk: (1) menganalisis secara komprehensif sifat kimia tanah (pH, Al-dd, H-dd, KTK) pada lahan marginal Kedungrandu, Banyumas; (2) menetapkan hubungan empiris antara pH tanah dan konsentrasi Al-dd guna memahami tingkat toksisitas aluminium; dan (3) merumuskan rekomendasi dosis pengapuran yang presisi dan berbasis analisis laboratorium. Temuan penelitian ini diharapkan memberikan guidance praktis bagi petani dan stakeholder pertanian untuk pengelolaan lahan marginal yang lebih efektif di wilayah Kedungrandu Banyumas.

BAHAN DAN METODE

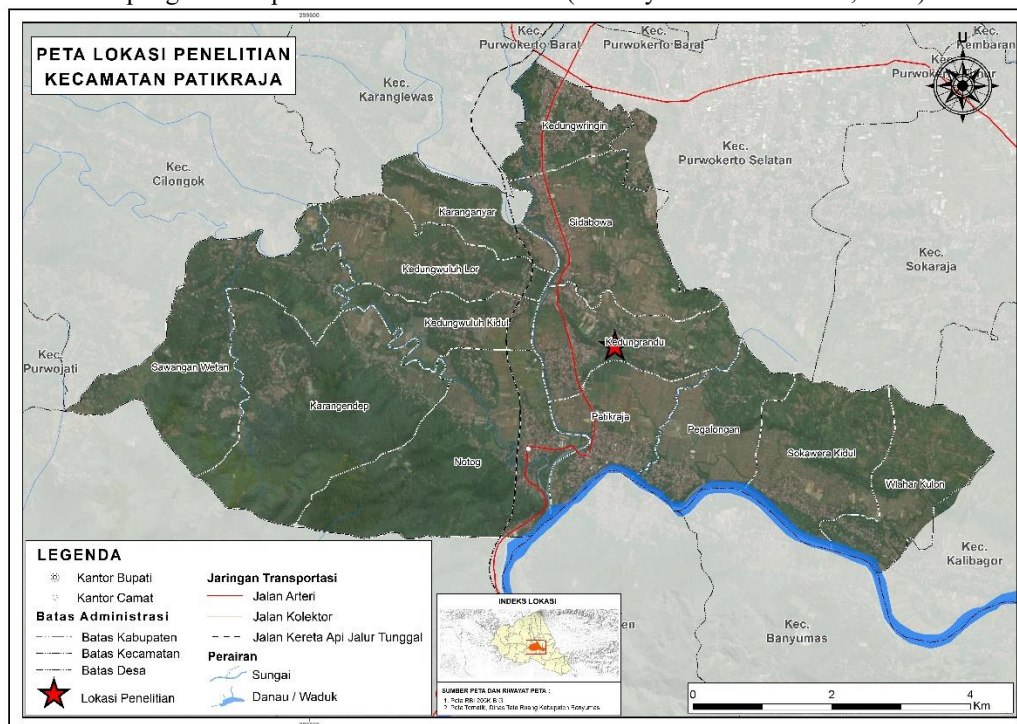
Lokasi, Waktu Penelitian, dan Desain Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari–Maret 2025 di Desa Kedungrandu, Kecamatan Patikraja, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah (koordinat: 7°26'15"S, 109°24'48"E). Lokasi dipilih karena: (1) tingkat kesuburan tanah yang rendah; (2) nilai pH tanah sangat masam ($\text{pH} < 5,5$) berdasarkan survei pendahuluan; (3) dominansi penggunaan lahan untuk pertanian jagung; dan (4) keterwakilan karakteristik lahan marginal di Kabupaten Banyumas. Iklim wilayah adalah tropis dengan

curah hujan tahunan 3.200 mm, tipe tanah Ultisol dengan tekstur lempung berpasir, dan sejarah penggunaan lahan sebagai lahan pertanian marginal selama > 20 tahun.

Desain penelitian adalah survei deskriptif-analitik. Pengambilan sampel menggunakan metode *purposive sampling* dengan penetapan area sampling berdasarkan homogenitas karakteristik lahan visual dan aksesibilitas lapangan. Sampel tanah diambil

pada dua kedalaman: 0–20 cm (lapisan *top soil*, areal perakaran utama) dan 20–40 cm (*subsoil*, menunjukkan kondisi tanah dalam jangka panjang). Untuk setiap kedalaman, 12 sub-sampel dikumpulkan mengikuti pola diagonal di seluruh area penelitian (luas $\approx$ 2 hektar) dan dicampur secara homogen menjadi 1 sampel komposit per kedalaman, sesuai standar *sampling* tanah (Handayani & Karnilawati, 2018).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Analisis Sifat Kimia Tanah

Analisis tanah dilakukan terhadap parameter utama yang berkaitan dengan kemasaman tanah yang merujuk pada (Balittanah, 2009). Parameter tersebut antara lain:

- pH Tanah**
Penentuan pH tanah dilakukan secara elektrometri menggunakan pH meter pada suspensi tanah dengan pelarut aquades (pH H₂O) menggunakan rasio 1:1. Metode ini bertujuan untuk mengukur aktivitas ion hidrogen (H⁺) dalam larutan tanah yang menjadi indikator utama tingkat kemasaman lahan.
- Aluminium dapat ditukar (Al-dd)**
Kandungan aluminium dapat ditukar ditentukan melalui metode ekstraksi menggunakan larutan KCl 1 N. Ekstrak tanah dititrasi dengan larutan standar natrium hidroksida (NaOH) untuk mengukur kemasaman total, kemudian ditambahkan natrium fluorida (NaF) dan dititrasi kembali menggunakan asam klorida (HCl) untuk menentukan nilai aluminium.
- Hidrogen dapat ditukar (H-dd)**

Nilai hidrogen dapat ditukar dihitung berdasarkan selisih antara kemasaman total hasil titrasi pertama dan nilai Al-dd yang telah diperoleh. H-dd merepresentasikan bagian dari kemasaman potensial tanah yang dipengaruhi oleh dominasi ion hidrogen pada kompleks pertukaran.

- Kapasitas Tukar Kation (KTK):** Diestimasi sebagai jumlah dari Al-dd, H-dd, dan kation basa (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺) yang dianalisis terpisah melalui ekstraksi amonium asetat pH 7,0.

Penentuan Kebutuhan Kapur

Kebutuhan kapur ditentukan berdasarkan nilai kemasaman dapat ditukar yang terdiri atas hidrogen dapat ditukar (H-dd) dan aluminium dapat ditukar (Al-dd), serta kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Pendekatan ini didasarkan pada konsep bahwa kebutuhan pengapuran tidak hanya dipengaruhi oleh kemasaman aktif yang tercermin dari nilai pH tanah, tetapi juga oleh kemasaman tersimpan (*reserve acidity*) yang berada pada kompleks pertukaran kation tanah. Oleh karena itu, kandungan H-dd dan Al-dd digunakan sebagai indikator utama dalam memperkirakan jumlah bahan pengapur yang

diperlukan untuk menetralkan kemasaman tanah dan meningkatkan kejenuhan basa.

Perhitungan kebutuhan kapur dilakukan menggunakan persamaan:

$$KK = (H-dd + Al-dd) \times KTK \times CF$$

KK adalah kebutuhan kapur (kg ha^{-1}), H-dd adalah hidrogen dapat ditukar ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), Al-dd adalah aluminium dapat ditukar ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), KTK adalah kapasitas tukar kation tanah ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), dan CF merupakan faktor koreksi (*correction factor*). Faktor koreksi digunakan untuk mengakomodasi perbedaan efisiensi reaksi bahan pengapur yang dipengaruhi oleh karakteristik tanah, terutama tekstur, kandungan bahan organik, kapasitas penyangga (*buffer capacity*), dan mineralogi liat. Pada penelitian ini digunakan nilai CF sebesar 1,0 sebagai nilai konservatif untuk tanah bertekstur lempung (Harefa & Meiman, 2024)

Tabel 1. Hasil Analisis Sifat Kimia Tanah pada Lahan Marginal

Kedalaman Tanah (cm)	pH H ₂ O	Al-dd (cmol(+)/kg)	H-dd (cmol(+)/kg)	KTK (cmol(+)/kg)
0–20	4,78	1,04	3,22	17,5
20–40	5,00	0,86	4,20	18,4

Berdasarkan Tabel 1 mengungkapkan beberapa pola penting: Pertama, pH tanah pada kedua kedalaman berkisar 4,78–5,00, jauh di bawah target pH 6,0 untuk pertumbuhan jagung optimal. Perbedaan pH antara kedua kedalaman relatif kecil, mengindikasikan bahwa kemasaman bersifat sistemik dan menyebar ke lapisan bawah tanah. konsentrasi Al-dd mencapai 0,86–1,04 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, atau 5,2–5,9 kali lebih tinggi dari keamanan untuk jagung ($< 0,2 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$; Kochian et al. (2015). Konsentrasi absolut Al-dd tetap sangat merugikan karena jagung merupakan tanaman yang sangat sensitif terhadap Al^{3+} . Penelitian Lelei et al. (2025) menunjukkan bahwa jagung mengalami penurunan hasil 25–50% pada Al-dd $> 0,5 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$, sehingga tanah penelitian ini berada dalam kategori sangat toksik terhadap aluminium untuk jagung. H-dd berkisar 3,22–4,20 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, signifikan lebih tinggi dibanding Al-dd. Total kemasaman tukar (Al-dd + H-dd) mencapai 4,26–5,06 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, merepresentasikan potensi kemasaman yang sangat tinggi. Dominasi H-dd mengindikasikan adanya kompleks asam organik selain Al^{3+} bebas dalam larutan tanah. Kondisi ini konsisten dengan karakteristik tanah Ultisol yang kaya akan bahan organik berderajat lanjut dekomposisi dan asam humat yang terserap pada kompleks pertukaran (Handayani & Karnilawati, 2018). Nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK) tanah pada lokasi penelitian berturut-turut sebesar 18,4 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dan 17,5 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. Berdasarkan kriteria penilaian sifat

Analisis Data

Data hasil analisis laboratorium disajikan dalam bentuk tabel dan ditelaah menggunakan pendekatan deskriptif-komparatif. Interpretasi hasil akan menunjukkan kriteria standar kesuburan tanah dan tingkat kemasamannya. Hubungan antara parameter pH, Al-dd, dan H-dd dikaji secara ilmiah untuk menjelaskan dinamika kemasaman tanah serta dampaknya terhadap ketersediaan hara esensial terhadap pertumbuhan tanaman jagung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sifat Kimia Tanah

Untuk mengetahui kondisi awal lahan marginal, dilakukan analisis terhadap beberapa parameter kimia tanah yang meliputi pH tanah, aluminium dapat ditukar (Al-dd), dan hidrogen dapat ditukar (H-dd). Hasil analisis sifat kimia tanah pada dua kedalaman disajikan pada Tabel 1.

kimia tanah yang umum digunakan di Indonesia, nilai tersebut termasuk dalam kategori sedang. Nilai KTK mencerminkan kemampuan koloid tanah, terutama fraksi liat dan bahan organik, dalam menjerap serta mempertukarkan kation hara seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , dan NH_4^{+} yang diperlukan tanaman. Semakin tinggi nilai KTK, semakin besar kemampuan tanah dalam menyimpan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman (Harefa & Meiman, 2024). Dari sudut pandang budidaya jagung (*Zea mays* L.), nilai KTK sebesar 17,5–18,4 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ menunjukkan kondisi yang cukup mendukung pertumbuhan tanaman. Namun demikian, peningkatan kandungan bahan organik melalui aplikasi pupuk kandang, kompos, biochar, atau pengembalian residu tanaman tetap diperlukan untuk meningkatkan kapasitas retensi hara tanah dan efisiensi pemupukan. Peningkatan bahan organik diketahui mampu meningkatkan jumlah muatan negatif tanah sehingga KTK meningkat dan kehilangan unsur hara akibat pencucian dapat diminimalkan (Andira et al., 2022).

Analisis Kebutuhan Kapur

Berdasarkan hasil analisis sifat kimia tanah, data yang diperoleh digunakan untuk menentukan kebutuhan kapur sebagai upaya perbaikan kesuburan tanah. Hasil analisis sifat kimia tanah dapat disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Interpretasi Kebutuhan Kapur pada Lahan Marginal

Parameter	Nilai	Kategori
pH tanah	4,78 - 5,00	Masam
Al-dd	0,86 -1,04 cmol(+)/kg	Sedang–Tinggi
H-dd	3,22 - 4,20 cmol(+)/kg	Tinggi
KTK	17,5 – 18,4 cmol(+)/kg	Sedang
Kebutuhan kapur	470 - 531 kg/ha	Rekomendasi sedang
Tanaman indikator	Jagung	Sensitif tanah masam

Hasil analisis menunjukkan bahwa tanah memiliki pH sebesar 4,78–5,00 yang tergolong masam, dengan kandungan Al-dd sebesar 0,86–1,04 cmol(+) kg⁻¹ dan H-dd sebesar 3,22–4,20 cmol(+) kg⁻¹. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemasaman tanah tidak hanya berasal dari ion H⁺ dalam larutan tanah, tetapi juga dari ion H⁺ dan Al³⁺ yang terikat pada kompleks pertukaran tanah. Pada kondisi tanah masam, kelarutan aluminium meningkat sehingga berpotensi menghambat pertumbuhan akar dan mengurangi kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara. Selain itu, pH yang rendah dapat menurunkan ketersediaan beberapa unsur hara penting, terutama fosfor, sehingga pertumbuhan tanaman menjadi kurang optimal (Makatita et al., 2025).

Berdasarkan nilai H-dd, Al-dd, dan KTK tanah yang berkisar antara 17,5–18,4 cmol(+) kg⁻¹, diperoleh kebutuhan kapur sebesar 470–531 kg ha⁻¹. Dosis tersebut termasuk kategori sedang dan menunjukkan bahwa tanah memerlukan tindakan ameliorasi untuk memperbaiki kondisi kemasaman. Kebutuhan kapur yang relatif tidak terlalu tinggi sejalan dengan kandungan Al-dd yang masih berada pada kisaran sedang serta nilai KTK yang tergolong sedang. Kapasitas tukar kation yang sedang menunjukkan bahwa tanah memiliki kemampuan menahan kation yang cukup baik sehingga proses peningkatan pH melalui pengapuran dapat berlangsung lebih efektif dibandingkan tanah dengan KTK rendah (Teul et al., 2024).

Pemberian kapur berfungsi menetralkan ion H⁺ dan Al³⁺ yang menjadi sumber kemasaman tanah. Reaksi pengapuran akan menghasilkan penurunan aktivitas aluminium dalam tanah serta meningkatkan pH menuju kondisi yang lebih sesuai bagi pertumbuhan tanaman. Selain itu, penggunaan kapur pertanian berbahan dasar kalsium karbonat (CaCO₃) atau dolomit juga berkontribusi dalam menyediakan unsur kalsium dan magnesium yang dibutuhkan tanaman untuk pertumbuhan akar, pembentukan jaringan tanaman, dan proses metabolisme (Alfaruqi et al., 2024).

Tanaman jagung (*Zea mays* L.) termasuk komoditas yang cukup responsif terhadap perbaikan pH tanah. Pertumbuhan jagung umumnya lebih baik

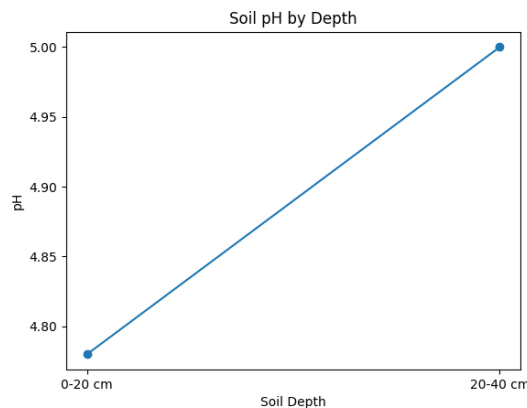
pada kisaran pH 5,5–6,5 dibandingkan pada tanah yang sangat masam. Oleh karena itu, aplikasi kapur sebesar 470–531 kg ha⁻¹ diharapkan mampu memperbaiki lingkungan perakaran, meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara, dan mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih optimal. Pengapuran sebaiknya dilakukan beberapa minggu sebelum tanam agar reaksi netralisasi berlangsung dengan baik dan kapur dapat tercampur merata pada lapisan olah tanah.

Penggambaran Data Sifat Kimia Tanah

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai pH tanah mengalami peningkatan dari 4,78 pada kedalaman 0–20 cm menjadi 5,00 pada kedalaman 20–40 cm (Gambar 2). Meskipun kedua lapisan masih tergolong masam, peningkatan pH pada lapisan bawah menunjukkan adanya perbedaan distribusi sumber kemasaman dan proses pedogenesis yang terjadi di dalam profil tanah.

Pada lapisan permukaan (0–20 cm), nilai pH yang lebih rendah umumnya berkaitan dengan akumulasi bahan organik dan aktivitas biologis yang lebih tinggi dibandingkan lapisan bawah. Proses dekomposisi bahan organik menghasilkan berbagai asam organik, seperti asam humat dan asam fulvat, yang dapat meningkatkan konsentrasi ion H⁺ dalam tanah sehingga menyebabkan pH menjadi lebih rendah. Selain itu, aktivitas perakaran tanaman dan mikroorganisme pada lapisan atas juga menghasilkan karbon dioksida (CO₂) yang bereaksi dengan air membentuk asam karbonat (H₂CO₃), sehingga turut berkontribusi terhadap peningkatan kemasaman tanah (Regasa et al., 2025).

Peningkatan pH pada kedalaman 20–40 cm menunjukkan bahwa lapisan bawah relatif lebih sedikit dipengaruhi oleh akumulasi bahan organik dan proses biologis dibandingkan lapisan atas. Kondisi ini menyebabkan produksi asam organik lebih rendah sehingga kemasaman tanah cenderung berkurang. Selain itu, pada beberapa jenis tanah, ion-ion basa seperti Ca²⁺, Mg²⁺, dan K⁺ yang tercuci dari lapisan atas dapat terakumulasi pada lapisan bawah, sehingga membantu meningkatkan pH tanah meskipun peningkatannya tidak terlalu besar (Zhang et al., 2023).



Gambar 2. Perubahan pH Tanah Berdasarkan Kedalaman

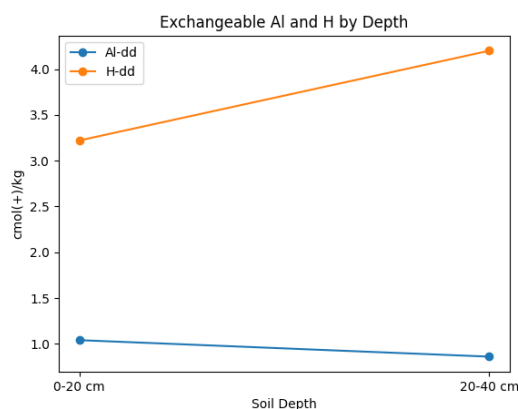
Perubahan pH yang terjadi juga berkaitan dengan distribusi aluminium dapat ditukar (Al-dd). Data menunjukkan bahwa nilai Al-dd menurun dari 1,04 cmol(+) kg⁻¹ pada kedalaman 0–20 cm menjadi 0,86 cmol(+) kg⁻¹ pada kedalaman 20–40 cm. Penurunan Al-dd sejalan dengan meningkatnya pH tanah karena kelarutan aluminium umumnya lebih tinggi pada kondisi tanah yang sangat masam. Semakin rendah pH tanah, semakin banyak ion Al³⁺ yang terlarut dan tersedia dalam kompleks pertukaran tanah. Oleh karena itu, peningkatan pH pada lapisan bawah berkontribusi terhadap penurunan konsentrasi aluminium dapat ditukar (Zishiri et al., 2022).

Peningkatan pH dari lapisan permukaan ke lapisan bawah menunjukkan bahwa intensitas kemasaman sedikit berkurang dengan bertambahnya kedalaman tanah. Namun, kedua lapisan masih termasuk tanah masam sehingga memerlukan pengelolaan kesuburan yang tepat melalui pengapuran dan penambahan bahan organik untuk menciptakan kondisi yang lebih mendukung bagi pertumbuhan tanaman.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan Aluminium dapat ditukar (Al-dd)

mengalami penurunan dari 1,04 cmol(+) kg⁻¹ pada kedalaman 0–20 cm menjadi 0,86 cmol(+) kg⁻¹ pada kedalaman 20–40 cm. Sebaliknya, kandungan Hidrogen dapat ditukar (H-dd) meningkat dari 3,22 cmol(+) kg⁻¹ menjadi 4,20 cmol(+) kg⁻¹ pada kedalaman yang lebih dalam. Pola ini menunjukkan bahwa sumber kemasaman tanah pada kedua lapisan memiliki karakteristik yang berbeda.

Hasil analisis pada Gambar 3, nilai Al-dd yang lebih tinggi pada lapisan permukaan berkaitan erat dengan pH tanah yang lebih rendah (pH 4,78). Pada kondisi masam, mineral-mineral yang mengandung aluminium mengalami pelapukan dan melepaskan ion Al³⁺ ke dalam larutan tanah. Ion Al³⁺ selanjutnya teradsorpsi pada kompleks pertukaran tanah dan terukur sebagai Al-dd. Semakin rendah pH tanah, semakin tinggi kelarutan aluminium sehingga kandungan Al-dd cenderung meningkat. Oleh karena itu, lapisan 0–20 cm yang memiliki pH lebih rendah menunjukkan kandungan Al-dd yang lebih tinggi dibandingkan lapisan 20–40 cm. Fenomena ini umum ditemukan pada tanah-tanah masam tropika yang mengalami pencucian basa secara intensif (Havlin et al., 2016).



Gambar 3. Kandungan Al-dd dan H-dd pada Berbagai Kedalaman

Berbeda dengan Al-dd, kandungan H-dd justru meningkat dari 3,22 cmol(+) kg⁻¹ pada lapisan atas menjadi 4,20 cmol(+) kg⁻¹ pada lapisan bawah.

Peningkatan H-dd pada kedalaman yang lebih dalam menunjukkan bahwa sebagian besar muatan negatif pada kompleks pertukaran tanah ditempati oleh ion

H⁺. Kondisi ini dapat terjadi akibat proses pencucian kation basa (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, dan Na⁺) dari lapisan atas ke lapisan bawah yang berlangsung dalam jangka waktu lama. Hilangnya kation basa dari kompleks pertukaran menyebabkan posisi tersebut digantikan oleh ion H⁺ sehingga nilai H-dd meningkat (Tiecher et al., 2022).

Meningkatnya H-dd pada lapisan bawah juga mengindikasikan adanya akumulasi kemasaman tersimpan (*reserve acidity*) dalam profil tanah. Meskipun pH lapisan bawah sedikit lebih tinggi dibandingkan lapisan atas, tingginya H-dd menunjukkan bahwa tanah masih memiliki potensi kemasaman yang cukup besar apabila ion H⁺ tersebut dilepaskan ke dalam larutan tanah. Dengan demikian, pH tanah saja tidak selalu dapat menggambarkan tingkat kemasaman secara menyeluruh, sehingga pengukuran H-dd dan Al-dd menjadi penting dalam evaluasi kebutuhan pengapuran. Jika dibandingkan, kontribusi H-dd terhadap kemasaman tanah pada lokasi penelitian lebih besar dibandingkan Al-dd. Hal ini terlihat dari nilai H-dd yang mencapai 3–4 kali lebih tinggi daripada Al-dd pada kedua kedalaman. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemasaman tanah lebih didominasi oleh ion H⁺ yang terperap pada kompleks pertukaran dibandingkan oleh aluminium dapat ditukar (Elly & Centhya, 2025). Temuan ini penting dalam menentukan strategi ameliorasi karena keberhasilan pengapuran akan sangat ditentukan oleh kemampuan bahan kapur dalam menetralkan kedua komponen kemasaman tersebut.

Penurunan Al-dd dan peningkatan H-dd seiring bertambahnya kedalaman tanah menunjukkan adanya perubahan bentuk kemasaman dalam profil tanah. Lapisan permukaan lebih dipengaruhi oleh kemasaman yang berasal dari aluminium dapat ditukar, sedangkan lapisan bawah lebih didominasi oleh hidrogen dapat ditukar. Meskipun demikian, kedua lapisan masih menunjukkan kondisi tanah masam sehingga pengapuran tetap diperlukan untuk menekan aktivitas Al³⁺ dan menurunkan konsentrasi H⁺ pada kompleks pertukaran tanah agar lingkungan tumbuh tanaman menjadi lebih optimal (Bell et al., 2024).

pH tanah memiliki hubungan positif dengan kapasitas tukar kation (KTK), terutama pada tanah yang mengandung bahan organik dan mineral liat bermuatan variabel. Peningkatan pH menyebabkan gugus fungsional pada bahan organik dan permukaan mineral liat mengalami deprotonasi sehingga menghasilkan lebih banyak muatan negatif yang dapat mengadsorpsi kation. Akibatnya, kapasitas tukar kation meningkat seiring dengan meningkatnya pH tanah (Song et al., 2025).

Fenomena tersebut tampak pada data penelitian, di mana peningkatan pH dari 4,78 menjadi 5,00 diikuti oleh peningkatan KTK dari 17,5 menjadi 18,4 cmol(+) kg⁻¹. Meskipun peningkatannya relatif kecil, hasil ini

mengindikasikan bahwa pada lapisan yang memiliki pH lebih tinggi tersedia lebih banyak tapak pertukaran kation. Dengan kata lain, sebagian muatan negatif yang sebelumnya terikat oleh ion H⁺ pada kondisi lebih masam mulai terbebaskan sehingga meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan kation (Lato et al., 2025). Namun demikian, besarnya perubahan KTK masih tergolong kecil sehingga dapat diduga bahwa KTK pada lokasi penelitian lebih banyak dipengaruhi oleh kandungan liat dan bahan organik dibandingkan oleh perubahan pH yang hanya sebesar 0,22 unit. Aluminium dapat ditukar (Al-dd) merupakan salah satu kation yang menempati kompleks pertukaran tanah pada kondisi masam. Secara umum, semakin rendah pH tanah maka semakin tinggi kelarutan aluminium dan semakin besar peluang ion Al³⁺ menempati kompleks pertukaran tanah (Bell et al., 2024).

Pada penelitian ini, peningkatan KTK dari 17,5 menjadi 18,4 cmol(+) kg⁻¹ justru diikuti oleh penurunan Al-dd dari 1,04 menjadi 0,86 cmol(+) kg⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara KTK dan Al-dd tidak bersifat langsung. KTK hanya menunjukkan jumlah tapak pertukaran yang tersedia, sedangkan jumlah aluminium yang menempati tapak tersebut lebih ditentukan oleh kondisi pH tanah. Ketika pH meningkat, sebagian ion Al³⁺ mengalami hidrolisis dan mengendap sebagai Al(OH)₃ sehingga konsentrasi aluminium dapat ditukar menurun (Regasa et al., 2025). Jika dihitung terhadap KTK, Al-dd hanya menempati sekitar 5,9% dari KTK pada lapisan 0–20 cm dan sekitar 4,7% pada lapisan 20–40 cm. Penurunan proporsi tersebut menunjukkan bahwa meningkatnya pH menyebabkan dominasi aluminium pada kompleks pertukaran semakin berkurang. Kondisi ini menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman karena risiko keracunan aluminium menjadi lebih rendah (Lato et al., 2025).

Berbeda dengan Al-dd, kandungan H-dd meningkat dari 3,22 cmol(+) kg⁻¹ pada lapisan atas menjadi 4,20 cmol(+) kg⁻¹ pada lapisan bawah bersamaan dengan meningkatnya KTK. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian tambahan tapak pertukaran pada lapisan bawah masih ditempati oleh ion H⁺. Apabila dinyatakan sebagai persentase terhadap KTK, H-dd menempati sekitar 18,4% dari KTK pada kedalaman 0–20 cm dan meningkat menjadi sekitar 22,8% pada kedalaman 20–40 cm. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun pH lapisan bawah sedikit lebih tinggi, kompleks pertukaran tanah masih didominasi oleh ion H⁺ sebagai sumber kemasaman potensial (Kharel et al., 2024).

Fenomena tersebut dapat dijelaskan oleh adanya akumulasi ion H⁺ pada kompleks pertukaran akibat pencucian kation basa dalam jangka panjang. Pada tanah tropika yang mengalami curah hujan tinggi, kation-kation basa seperti Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, dan

Na^+ mudah tercuci dari profil tanah. Kehilangan kation basa tersebut menyebabkan tapak pertukaran lebih banyak ditempati oleh ion H^+ sehingga nilai H-dd tetap tinggi meskipun pH tanah sedikit meningkat (Song et al., 2025).

Tingkat kemasaman tanah juga diperkuat oleh nilai aluminium dapat ditukar (Al-dd) dan hidrogen dapat ditukar (H-dd) yang relatif tinggi. Dominasi H-dd menunjukkan bahwa kemasaman tanah sebagian besar disebabkan oleh ion hidrogen, namun keberadaan aluminium tetap menjadi faktor pembatas utama karena bersifat toksik. Pada kondisi pH rendah, aluminium berada dalam bentuk Al^{3+} yang dapat menghambat pertumbuhan akar dengan merusak jaringan meristem dan mengganggu penyerapan air serta unsur hara (Zishiri et al., 2022). Hal ini terlihat pada Gambar 2 yang menunjukkan bahwa meskipun nilai Al-dd cenderung menurun pada lapisan bawah, nilai H-dd justru meningkat, sehingga secara keseluruhan tingkat kemasaman tanah tetap tinggi dan berpotensi menghambat pertumbuhan tanaman.

KESIMPULAN

Tanah pada lahan marginal tanah pada lahan marginal Kedungrandu, Banyumas memiliki tingkat kemasaman yang tinggi dengan pH H_2O berkisar 4,78–5,00, Al-dd 0,86–1,04 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, H-dd 3,22–4,20 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, dan KTK 17,5–18,4 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. Peningkatan pH tanah dari 4,78 menjadi 5,00 diikuti oleh penurunan Al-dd, menunjukkan bahwa pH berperan dalam mengurangi kelarutan dan potensi toksisitas aluminium pada tanah masam. Berdasarkan hasil analisis sifat kimia tanah, kebutuhan kapur yang direkomendasikan berkisar antara 470–531 kg ha^{-1} . Pengapuran pada dosis tersebut diharapkan mampu memperbaiki kondisi kimia tanah, menekan kemasaman, dan meningkatkan kesesuaian lahan untuk budidaya jagung pada lahan marginal di Kedungrandu, Banyumas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman atas segala sarana dan prasarana yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Selain itu, apresiasi juga ditujukan kepada tim asisten lapangan dan staf laboratorium yang telah membantu kelancaran proses pengambilan sampel serta analisis kimia tanah di wilayah Desa Kedungrandu, Kecamatan Patikraja, Kabupaten Banyumas.

DAFTAR PUSTAKA

Alfaruqi, F., Vera, O. S., Kasdi, P. (2024). Pengaruh pemberian pupuk hayati dan kapur dolomit terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kacang hijau (*Vigna radiata* L.). *JPlantklopedia*, 4(2), 110–127. e-ISSN: 2776-

4281.

- Andira, U., Killa, Y. M., & Kapoe, S. K. K. L. (2022). Analisis sifat kimia tanah pada lahan pandawai Kabupaten Sumba Timur. *Jurnal Agro Indragiri*, 7(2), 22–26. doi.org/10.32520/jai.v4i1.
- Balittanah. (2009). *Juknis Kimia Tanah*. Balai Penelitian Tanah. Bogor.
- Bell, L. E., Jim L. M., & A. D. B. (2024). The effects of soil acidity and aluminium on the root systems and shoot growth of lotus pedunculatus and *Lupinus polyphyllus*. *Plants*, 13(2268), 1–13. 13, 2268. doi.org/10.3390/plants13162268.
- Elly, S.S. & Centhya, V. M. (2025). Karakteristik tanah berdasarkan kandungan unsur hara makro, C-Organik, dan pH pada budidaya salak merah (*Salacca edulis* Reinw.) di Rumahsoal, Taniwel, Kabupaten Seram Bagian Barat. *Journal of Science and Technology*, 5(2), 151–161.
- Enesi, R. O., Dyck, M., Chang, S., Thilakarathna, M. S., Fan, X., Strelkov, S., & Gorim, L. Y. (2023). *Liming remediates soil acidity and improves crop yield and pro fi tability - a meta-analysis*. June, 1–13. https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896.
- Ganti, N. W. S. L. S., Sahta, G., & Sitti, L. (2023). Pengaruh pemberian pupuk organik terhadap sifat kimia tanah masam dan hasil tanaman jagung (*Zea mays* L.). *Jurnal Berkala Penelitian Agronomi*, 11(1), 24–34. doi.org/10.33772/bpa.v11i1.400.
- Handayani, S. & Karnilawati. (2018). Karakterisasi dan klasifikasi tanah ultisol di Kecamatan Indrajaya Kabupaten Pidie. *Jurnal Ilmiah Pertanian*, 14(2), 52–59.
- Harefa, D. F. C., & Meiman, Z. (2024). Peran kapasitas tukar kation dalam mempertahankan kesuburan tanah pada berbagai jenis tekstur tanah. *PENARIK: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan*, 01(1), 165–170. ISSN 3063-6469 (E).
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2016). *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson India. https://books.google.co.id/books?id=BxEwDwAAQBAJ.
- Kharel, S. A., Abbadie, C. A., A. A. A. G., Gazey, C. A., & Kingwell, R. A. (2024). *Liming acidic soils creates pro fi ts , land use options but often more emissions*. https://doi.org/10.1071/CP24227.
- Kochian, L. V, Pi, M. A., & Liu, J. (2015). *Plant Adaptation to Acid Soils: The Molecular Basis for Crop Aluminum Resistance*. January, 1–28. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822.

- Lato, A., Adina, B., Iaroslav, L., Florin, C., Laura, C., Florin, S., & Isidora, R. (2025). *Mitigating soil acidity: impact of aglime (CaCO₃) particle size and application rate on exchangeable aluminium and base cations dynamics*. *Sustainability*, 17, 178135. doi.org/10.3390/su17188135.
- Lelei, D. K., Sultan, M. S., & Kuboja, N. M. (2025). *Enhancing maize (Zea mays) productivity through integrated soil fertility management: a participatory approach in the degraded soils of May*, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1537292>.
- Makatita, S. R., & Razie, F. (2025). Pengaruh amelioran terhadap kemasaman dan ketersediaan P tanah ultisol. *Acta Solum*, 3(2), 102–109. <https://doi.org/10.20527/actasolum.v3i2.2884>.
- Prihantoro, I., Permana, A. T., Aditia, E. L., & Waruwu, Y. (2023). Efektivitas pengapuran dalam meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman sorgum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) sebagai hijauan pakan ternak. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 297–304. <https://doi.org/10.18343/jipi.28.2.297>.
- Putri, A.W.C., Eko, S., & S. (2024). Kajian Alih Fungsi Lahan Pertanian ke Non-Pertanian di Kecamatan Junrejo, Kota Batu. *Jurnal Widya Bhumi*, 4(1), 16–34.
- Regasa, A., Haile, W., & Abera, G. (2025). Effects of lime and vermicompost application on soil physicochemical properties and phosphorus availability in acidic soils, *Scientific reports*, 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02053-4>.
- Song, H., Shi, J., Rou, W., Tao, J., & Yishu, P. (2025). Interaction of soil pH, organic matter, exchangeable acidity, and cation exchange capacity in a managed tea farm. *PeerJ*, 1–21. <https://doi.org/10.7717/peerj.20341>.
- Teul, M. U., Killa, Y. M., & Ndapamuri, M. H. (2024). Pengaruh beberapa tipe penggunaan lahan Wula Waijelu Kabupaten Sumba Timur. *Argro Indragiri*, 10(1), 41–46. doi.org/10.32520/jai.v4i1.
- Thi, L. K., Yunusa, I. A. M., * M. A. R., Zerihun, A., & Nguyen, and H. M. (2023). *Responses in growth, yield and cob protein content of baby corn (Zea mays) to amendment of an acid sulfate soil with lime, organic fertiliser and biochar*, *Crop & Pasture Science*. <https://doi.org/10.1071/CP21812>.
- Tiecher, T., Dick, P., Varella, P. A., Brunetto, G., & Joel, F. (2022). Base saturation is an inadequate term for Soil Science. *RBCS*, 1–6. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220125>.
- Zhang, J., Qu, X., Song, X., Xiao, Y., Wang, A., & Li, D. (2023). Spatial variation in soil base saturation and exchangeable cations in tropical and subtropical China. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030781>.
- Zishiri, R. M., Mutengwa, C. S., & Tandzi, L. N. (2022). Growth response and dry matter partitioning of quality protein maize (*Zea mays* L.) under aluminium toxicity, *Agronomy*, <https://doi.org/10.3390/agronomy12061262>.