

Pengaruh Pemberian Kombinasi Limbah *Decanter Solid* dan Abu Boiler Kelapa Sawit terhadap Perubahan Beberapa Sifat Kimia Tanah Ultisol

Riska Fitrianty Nurjanah*, Muhammad Mahbub, Hairil Ifansyah

Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat, Jalan Jenderal A. Yani KM 36 Simpang Empat, Banjarbaru 70714, Indonesia

* Email penulis korespondensi: rfitriantynurjanah@gmail.com

Informasi Artikel

Received 8 September 2024
Accepted 9 Juli 2025
Published 20 Juli 2025
Online 20 Juli 2025

Keywords:

Boiler ash; Decanter solid;
NPK availability; Soil pH;
Ultisols

Abstract

Ultisols are acidic mineral soils with various problems: high soil acidity, Al^{3+} concentration, and nutrient-poor conditions. One way to increase soil fertility and quality is by using an ameliorant. Palm oil waste can be used to make ameliorant. Palm oil decanter cake and palm oil boiler ash are the types of palm oil waste used in this research. Providing Palm oil decanter cake and palm oil boiler ash can increase pH, available N-mineral, P concentration, and Exchangeable-K in Ultisols. This research aims to determine the effect of providing waste decanter solid and palm oil boiler ash on changes in several chemical properties of Ultisol soil and the best combination of palm oil solid waste (decanter solid) and palm oil boiler ash to improve several soil chemical properties, namely, pH, availability of nitrogen, phosphorus and potassium in Ultisols. This research used a Completely Randomized Design Method factorial with two factors, the first factor being a Palm oil decanter cake (0, 5, and 10 t ha⁻¹), and the second factor being palm oil boiler ash (0, 5, and 10 t ha⁻¹), with three repetitions. This research was conducted in a greenhouse and analyzed in a soil physics, chemistry, and biology laboratory. The research results show that a combination of Palm oil decanter cake and palm oil boiler ash significantly affects pH, N-mineral concentration, and available P, and palm oil boiler ash can increase the Exchangeable-K concentration.

1. Pendahuluan

Tanah Ultisol merupakan salah satu jenis tanah dengan sebaran luas di Indonesia, mencapai sekitar 45,79 juta hektar atau hampir 25% dari total luas daratan nasional (Purwanto *et al.*, 2021). Wilayah dengan dominasi Ultisol terbesar adalah Kalimantan, dengan luas mencapai 21,93 juta hektar. Namun demikian, lahan Ultisol umumnya memiliki produktivitas yang rendah, sehingga pemanfaatannya terbatas terutama pada sektor perkebunan, seperti kelapa sawit dan karet. Rendahnya produktivitas tanah Ultisol berkaitan erat dengan karakteristik fisik dan kimia tanah yang kurang mendukung bagi pertumbuhan tanaman pangan maupun tanaman semusim lainnya.

Salah satu permasalahan utama tanah Ultisol adalah kemiskinan unsur hara dan tingkat kemasaman tanah yang tinggi. Kandungan hara yang rendah, terutama unsur fosfor (P) serta kation dapat tukar seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), dan kalium (K), menjadi hambatan serius dalam pengembangan lahan pertanian di wilayah Ultisol. Selain itu, konsentrasi ion Al^{3+} yang tinggi memperparah tingkat kemasaman tanah, mengganggu pertumbuhan akar tanaman, dan menurunkan efisiensi pemupukan (Herwitarahman dan Adwiyani, 2025). Oleh karena itu, upaya perbaikan sifat kimia tanah menjadi penting untuk meningkatkan produktivitas lahan Ultisol.

Penggunaan bahan amelioran merupakan salah satu pendekatan yang efektif dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Amelioran dapat berasal dari bahan organik maupun anorganik, tergantung pada ketersediaan dan efektivitasnya dalam memperbaiki kondisi tanah. Di tengah tingginya produksi minyak kelapa sawit di Indonesia, limbah padat hasil pengolahan kelapa sawit berpotensi besar untuk dimanfaatkan sebagai amelioran. Berbagai jenis limbah padat yang dihasilkan dari industri kelapa sawit, seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang, serabut, lumpur *decanter* (*decanter solid*), dan abu *boiler* (ABKS), memiliki kandungan bahan organik dan mineral yang tinggi (Naldi, 2022).

Decanter solid merupakan limbah hasil olahan *mesokarp* kelapa sawit yang masih mengandung bahan organik dan unsur hara yang bermanfaat bagi tanah (Imran dan Mustaka, 2020). Sementara itu, abu boiler kelapa sawit merupakan hasil pembakaran cangkang dan serat kelapa sawit di mesin boiler yang mengandung unsur fosfor dan kation basa, sehingga dapat meningkatkan pH tanah serta menambah ketersediaan hara (Abdillah dan Aldi., 2020). Pemanfaatan kombinasi kedua limbah ini sebagai amelioran diharapkan mampu memperbaiki sifat kimia tanah Ultisol secara sinergis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit terhadap perbaikan sifat kimia tanah Ultisol, khususnya dalam meningkatkan nilai pH tanah serta ketersediaan unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan kombinasi dosis terbaik dari kedua jenis limbah tersebut guna memperoleh hasil perbaikan sifat kimia tanah yang optimal. Belum adanya penelitian terdahulu yang terfokus pada ketersediaan unsur hara makro setelah pemberian pembenah *decanter solid* dan abu boiler menjadi kebaruan dalam penelitian ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah bagi perumusan strategi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit sebagai amelioran alternatif untuk lahan marginal, khususnya Ultisol. Bagi pemerintah, temuan ini dapat dimanfaatkan dalam penyusunan kebijakan pengelolaan limbah industri berbasis ekonomi sirkular dan pembangunan pertanian berkelanjutan melalui program revitalisasi lahan suboptimal. Sementara itu, bagi petani, pemanfaatan limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit dapat menjadi solusi praktis dan ekonomis untuk meningkatkan kesuburan tanah serta produktivitas pertanian tanpa ketergantungan penuh pada pupuk kimia anorganik. Dengan demikian, integrasi antara sektor industri kelapa sawit dan pertanian dapat menciptakan sinergi yang berkelanjutan, memperbaiki kondisi tanah secara ekologis, serta memberikan manfaat ekonomi bagi petani di wilayah dengan karakteristik Ultisol.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di rumah kaca serta Laboratorium Fisika, Kimia, dan Biologi Tanah yang berada di bawah naungan Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lambung Mangkurat (ULM), Banjarbaru, Kalimantan Selatan. Kegiatan penelitian mencakup tahap persiapan bahan, analisis karakteristik tanah dan bahan amelioran, serta pengamatan pertumbuhan tanaman secara terkontrol di lingkungan rumah kaca. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis Ultisol yang dikoleksi dari wilayah Kelurahan Cempaka, Kecamatan Cempaka, Kota Banjarbaru. Tanah tersebut dipilih karena memiliki sifat kimia yang kurang subur, seperti pH rendah, kandungan bahan organik rendah, dan kejenuhan basa yang rendah, sehingga relevan untuk kajian efektivitas bahan amelioran. Adapun bahan organik dan amelioran yang digunakan berupa limbah padat kelapa sawit (*decanter solid*) dan abu boiler, yang diperoleh langsung dari Pabrik Kelapa Sawit milik PTPN XIII. Pemanfaatan limbah industri ini bertujuan untuk menilai potensi keduanya sebagai bahan pembenah tanah dalam upaya meningkatkan kesuburan tanah marginal dan mendukung prinsip pertanian berkelanjutan.

Penelitian dilakukan dari bulan November 2023 hingga Mei 2024 menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) faktorial dua faktor. Faktor pertama adalah dosis limbah padat kelapa sawit: 0 t ha⁻¹, 5 t ha⁻¹, dan 10 t ha⁻¹. Faktor kedua adalah dosis abu boiler: 0 t ha⁻¹, 5 t ha⁻¹, dan 10 t ha⁻¹. Kombinasi perlakuan berjumlah sembilan, masing-masing diulang sebanyak tiga kali sehingga terdapat 27 satuan percobaan (unit percobaan).

2.2. Pelaksanaan Penelitian

Tanah Ultisol diambil dari kedalaman 0–20 cm, kemudian dimasukkan ke dalam karung. Tanah dikeringanginkan, lalu dibuat sampel komposit, ditumbuk, dan diayak menggunakan saringan berukuran 2 mm. Sebagian tanah digunakan untuk analisis awal di laboratorium. Tanah yang telah diayak kemudian ditimbang sebanyak 500 g dan dimasukkan ke dalam pot. Setiap pot diberi perlakuan sesuai dosis limbah *decanter solid* dan abu boiler yang telah ditentukan. Selanjutnya, tanah diinkubasi selama empat minggu dengan penyiraman dua kali seminggu untuk menjaga kelembaban. Setelah inkubasi, seluruh tanah diambil, dimasukkan ke dalam kantong plastik, dan disimpan pada suhu ruang hingga dilakukan analisis.

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi sifat kimia tanah yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman, yaitu pH tanah, kandungan nitrogen mineral, fosfor tersedia, dan kalium dapat dipertukarkan (K-dd). Pengukuran pH tanah dilakukan dengan metode H₂O 1:5, yang merepresentasikan tingkat keasaman atau kebasaan tanah sebagai indikator penting dalam ketersediaan unsur hara. Analisis nitrogen mineral dilakukan melalui metode titrasi untuk menentukan kadar nitrogen yang dapat langsung diserap oleh tanaman. Fosfor tersedia dianalisis menggunakan metode Bray I, yang umum digunakan untuk tanah dengan reaksi masam, sedangkan kandungan K-dd diperoleh melalui ekstraksi menggunakan larutan amonium asetat (NH₄OAc) 1 N pada pH 7. Seluruh metode analisis ini mengacu pada prosedur yang dijelaskan oleh Ifansyah (2008), sehingga memberikan dasar yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.3. Analisis Data

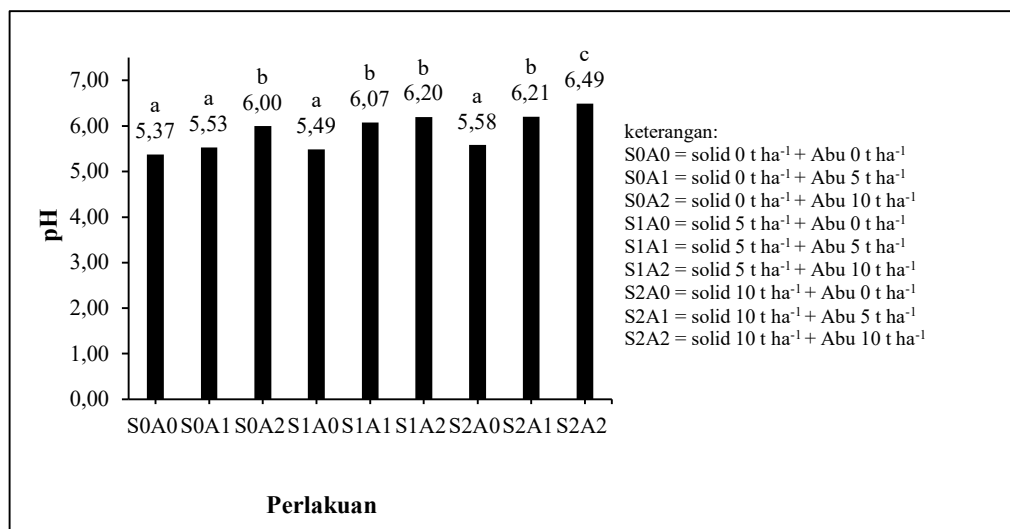
Data pengamatan kemudian dianalisis dengan uji kehomogenan ragam Bartlett. Apabila data homogen dilanjutkan dengan analisis ragam ANOVA (*Analysis of Variance*). Tetapi jika hasil analisis tidak homogen maka dilakukan transformasi agar menjadi homogen dan selanjutnya dilakukan analisis ragam ANOVA. Apabila terdapat pengaruh yang nyata dilihat dari nilai $F_{hitung} \geq F_{tabel}$ pengujian dapat dilanjutkan dengan uji perbandingan berganda metode DMRT (*Duncan Multiple Range Test*) pada selang kepercayaan 95% atau α 5% untuk mengetahui perbedaan masing-masing perlakuan (Mahbub, 2021).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kemasaman tanah

Hasil uji kehomogenan ragam terhadap data pH tanah menunjukkan bahwa data yang diperoleh bersifat homogen, sehingga memenuhi asumsi dasar untuk dilakukan analisis ragam (ANOVA). Berdasarkan hasil analisis ragam, interaksi antara aplikasi limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit pada berbagai dosis menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap peningkatan nilai pH tanah Ultisol. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi kedua bahan amelioran tersebut memberikan efek sinergis dalam memperbaiki sifat kimia tanah yang masam. Selanjutnya, hasil uji lanjut nilai tengah (Gambar 1) memperlihatkan bahwa perlakuan kombinasi *decanter solid* 10 ton ha⁻¹ dan abu boiler 10 ton ha⁻¹ (S2A2) memberikan peningkatan pH tanah yang paling signifikan dibandingkan dengan perlakuan kontrol maupun perlakuan kombinasi lainnya. Perlakuan S2A2 terbukti mampu menaikkan pH tanah secara nyata, sehingga dapat dianggap sebagai perlakuan terbaik dalam memperbaiki reaksi tanah Ultisol yang awalnya bersifat masam. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah organik dan abu boiler secara terpadu berpotensi sebagai strategi pengelolaan tanah berkelanjutan, terutama pada lahan-lahan marginal seperti Ultisol.

Secara ilmiah, mekanisme peningkatan pH tanah melalui perlakuan S2A2 dapat dijelaskan melalui kontribusi kimiawi dari masing-masing bahan (Mulya *et al.*, 2025). Abu boiler mengandung komponen basa seperti kalsium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), kalium (K⁺), dan natrium (Na⁺) dalam bentuk oksida maupun karbonat (Simanjuntak *et al.*, 2024). Komponen tersebut berperan dalam proses netralisasi ion hidrogen (H⁺) dan aluminium (Al³⁺) terlarut yang menyebabkan kemasaman tanah (Herwitarahman dan Adwiyani, 2025). Reaksi netralisasi ini mengurangi konsentrasi ion H⁺ dalam larutan tanah dan meningkatkan pH secara bertahap (Pitaloka *et al.*, 2023). Sementara itu, *decanter solid* sebagai limbah organik kelapa sawit memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dan mampu meningkatkan kapasitas penyangga tanah (*buffering capacity*) (Harefa dan Zebua, 2024), serta mendukung aktivitas mikroba yang secara tidak langsung membantu proses pelapukan bahan organik dan pembentukan senyawa humat yang juga bersifat menetralkan keasaman tanah (Siregar dan Duaja, 2025). Interaksi antara abu boiler yang bersifat kimiawi dan *decanter solid* yang bersifat organik menciptakan kondisi lingkungan tanah yang lebih seimbang, stabil, dan kondusif bagi pertumbuhan tanaman (H-Kittikun *et al.*, 2021). Kombinasi ini juga dapat memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan retensi unsur hara, sehingga berdampak positif tidak hanya terhadap pH tetapi juga terhadap kesuburan tanah secara umum (Chan *et al.*, 2021).



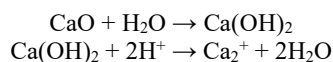
Gambar 1. Pengaruh pemberian limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit terhadap perubahan pH tanah. Diagram batang yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan berdasarkan uji nilai tengah DMRT 5%.

Perlakuan kombinasi dengan dosis tertinggi, yaitu aplikasi limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit masing-masing sebesar 10 ton ha⁻¹, terbukti sebagai perlakuan terbaik dalam meningkatkan pH tanah Ultisol. Perlakuan ini menghasilkan nilai pH rata-rata sebesar 6,45 yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan kontrol maupun perlakuan lainnya. Peningkatan ini menunjukkan bahwa intervensi bahan amelioran organik dan anorganik secara bersamaan memberikan dampak positif terhadap perbaikan sifat kimia tanah yang semula bersifat sangat masam.

Peningkatan nilai pH ini terjadi karena kombinasi antara *decanter solid* dan abu boiler mengandung senyawa-senyawa penting yang mampu menetralkan keasaman tanah (Hariana *et al.*, 2024). Abu boiler kelapa sawit mengandung mineral-mineral basa seperti kalsium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), dan kalium (K⁺), yang berperan dalam reaksi netralisasi ion H⁺ dan Al³⁺ dalam tanah (Bian *et al.*, 2025), sehingga mampu menurunkan tingkat keasaman (Suan *et al.*, 2017). Di sisi lain, *decanter solid* yang kaya akan bahan organik berperan dalam meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) (Ahmad *et al.*, 2023), serta memperbaiki struktur dan aktivitas biologis tanah (Rupani *et al.*, 2022). Menurut Sothe *et al.* (2022) bahwa salah satu fungsi penting dari bahan organik adalah kemampuannya meningkatkan kapasitas retensi air tanah.

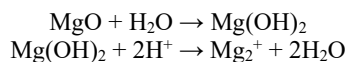
Retensi air, yaitu kemampuan tanah dalam menahan dan menyimpan air, memiliki kaitan erat dengan perubahan pH tanah (Angst *et al.*, 2021). Semakin tinggi kapasitas retensi air, semakin besar pula kandungan larutan tanah yang dapat menyimpan basa-basa penetral. Kondisi ini menyebabkan konsentrasi ion H⁺ di dalam larutan tanah menurun, sehingga pH meningkat (Kannan *et al.*, 2021). Oleh karena itu, sinergi antara mineral basa dari abu boiler dan bahan organik dari *decanter solid* tidak hanya meningkatkan pH secara langsung melalui reaksi kimia, tetapi juga secara tidak langsung melalui perbaikan sifat fisik dan biologi tanah (Huang *et al.*, 2021). Dengan demikian, perlakuan kombinasi ini berpotensi besar sebagai solusi amelioratif yang ramah lingkungan dalam pengelolaan tanah Ultisol yang marginal. Adapun reaksi netralisasi asam dapat dilihat dibawah:

1. Reaksi netralisasi asam oleh kalsium oksida (CaO)



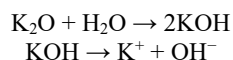
Kalsium oksida (CaO) bereaksi dengan air dan menghasilkan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂), lalu Ca(OH)₂ bereaksi dengan ion hidrogen menghasilkan ion kalsium dan air (Sposito, 2008).

2. Reaksi netralisasi oleh magnesium oksida (MgO)



Magnesium oksida (MgO) bereaksi dengan air menghasilkan magnesium hidroksida (Mg(OH)₂), lalu Mg(OH)₂ bereaksi dengan ion hidrogen menghasilkan ion magnesium dan air (Sposito, 2008).

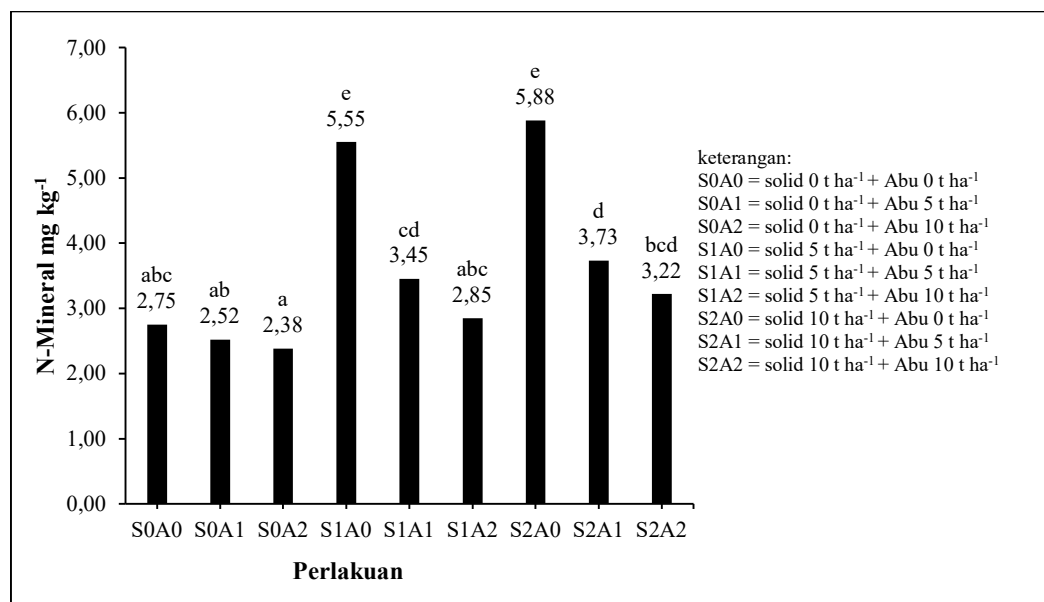
3. Reaksi kalium oksida (K₂O) dengan air



Kalium oksida (K₂O) bereaksi dengan air menghasilkan senyawa KOH yang bersifat basa (Sposito, 2008).

3.2 N-mineral pada tanah

Hasil uji kehomogenan ragam terhadap konsentrasi N-mineral menunjukkan data homogen. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa interaksi antara pemberian limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit pada berbagai dosis berpengaruh sangat nyata terhadap konsentrasi N-mineral pada tanah Ultisol. Hasil uji nilai tengah (Gambar 2) menunjukkan pemberian kombinasi limbah *decanter solid* 10 t ha⁻¹ (S2A0) berbeda nyata meningkatkan konsentrasi N-mineral tanah terhadap kontrol. Namun tidak berbeda nyata meningkatkan N-mineral dibandingkan perlakuan limbah *decanter solid* 5 t ha⁻¹ (S1A0).



Gambar 2. Pengaruh pemberian limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit terhadap perubahan pH tanah. Diagram batang yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan berdasarkan uji nilai tengah DMRT 5%.

Perlakuan limbah *decanter solid* tunggal dengan dosis 5 t ha⁻¹ merupakan perlakuan dosis terbaik yang dapat meningkatkan konsentrasi N-mineral dengan rerata 5,72 mg kg⁻¹ jika dibandingkan dengan kontrol dan perlakuan lainnya. Pemberian perlakuan limbah *decanter solid* tunggal dengan dosis 5 t ha⁻¹ pada tanah dapat meningkatkan konsentrasi N-mineral dibandingkan tanah tanpa perlakuan (kontrol) disebabkan oleh bahan organik pada limbah *decanter solid* selain itu limbah *decanter solid* juga mengandung N.

Meskipun pemberian kombinasi limbah *decanter solid* dan abu boiler menunjukkan pengaruh sangat nyata dan berbeda nyata dibandingkan kontrol, namun jika dilihat dari diagram peningkatan konsentrasi N-mineral yang diberi perlakuan kombinasi tidak signifikan perlakuan yang diberi limbah *decanter solid* tunggal. Menurut Auliadesti (2025), pada kondisi pH tanah yang lebih tinggi, terutama di atas pH 7 rentan terjadinya volatilisasi yang dapat menyebabkan kurang optimalnya ketersediaan N-mineral pada tanah.

Pada kondisi tanah dengan pH tinggi, terutama di atas 7, nitrogen hasil mineralisasi bahan organik yang berwujud ion amonium (NH₄⁺) cenderung mengalami transformasi menjadi gas amonia (NH₃) yang mudah menguap ke atmosfer (Legasari, 2024). Proses ini dikenal sebagai volatilisasi amonia, yang sangat dipengaruhi oleh keseimbangan kimia antara NH₄⁺ dengan NH₃ dan bergantung pada pH tanah. Kenaikan pH akan memperbesar fraksi NH₃ bebas, meningkatkan potensi kehilangan nitrogen dari tanah (Chu *et al.*, 2023). Selain pH, faktor lingkungan seperti suhu yang tinggi dan kelembaban tanah yang rendah juga mempercepat terjadinya volatilisasi, karena meningkatkan aktivitas mikroba dan mempercepat penguapan NH₃ dari permukaan tanah. Wang *et al.* (2021) menjelaskan bahwa kehilangan nitrogen akibat volatilisasi dapat mencapai 20–50% dari total nitrogen yang diaplikasikan, terutama jika nitrogen diberikan dalam bentuk urea atau bahan organik kaya N pada kondisi yang tidak dikontrol.

Dalam konteks penggunaan limbah industri kelapa sawit, seperti limbah *decanter solid* dan abu boiler, kombinasi keduanya menunjukkan potensi dalam memperbaiki kesuburan tanah karena kandungan bahan organik dan unsur hara makro. Namun, abu boiler memiliki karakteristik alkalin yang dapat meningkatkan pH tanah secara signifikan, sehingga secara tidak langsung dapat memperbesar risiko volatilisasi nitrogen ketika dikombinasikan dengan bahan kaya nitrogen seperti *decanter solid*. Paramisparam *et al.* (2021) melaporkan bahwa aplikasi abu boiler dapat meningkatkan pH tanah hingga lebih dari 7,5 pada tanah Inceptisol, yang berdampak pada penurunan efisiensi nitrogen. Oleh karena itu, meskipun secara teoritis kombinasi ini dapat meningkatkan ketersediaan hara, efektivitasnya terhadap ketersediaan nitrogen mineral belum sepenuhnya dipahami. Sardar *et al.* (2023) menegaskan perlunya penelitian lebih lanjut untuk memahami dinamika nitrogen dalam sistem ini secara komprehensif, terutama pada berbagai tipe tanah dan kondisi iklim mikro tropis.

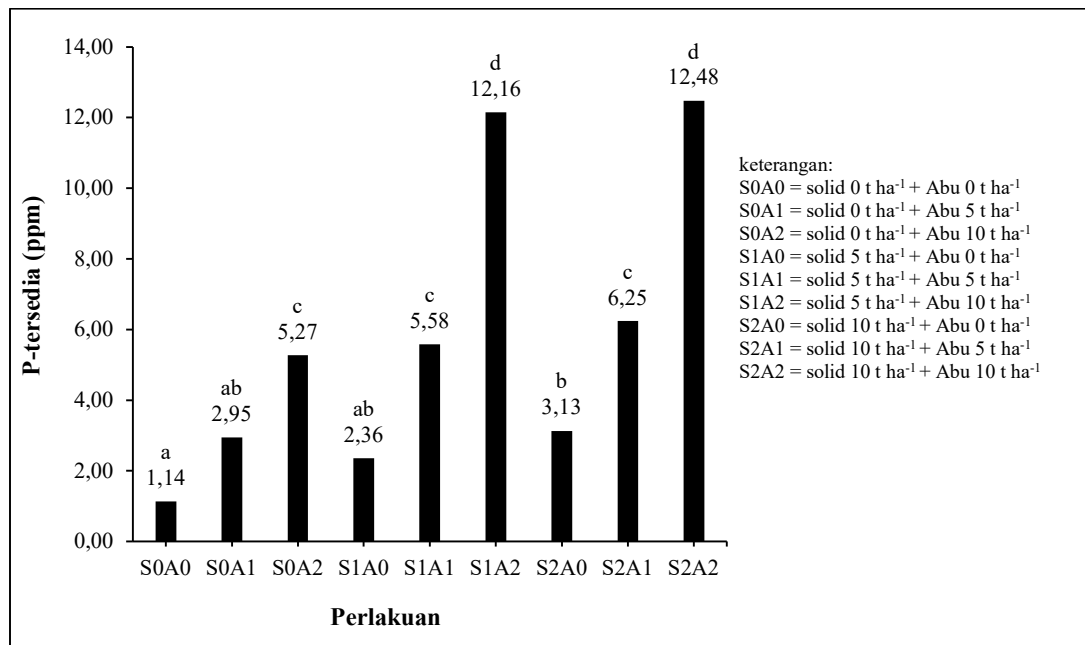
Kenaikan konsentrasi N-mineral pada tanah Ultisol masih berkaitan dengan kandungan nitrogen dan bahan organik pada limbah *decanter solid*. Bahan organik dapat meningkatkan kapasitas retensi air pada tanah dan akan berpengaruh secara langsung terhadap peningkatan larutan tanah. Sebagian besar reaksi biogeokimia terjadi di

larutan tanah, karena sebagian reaksi kimia melibatkan larutan tanah. Proses seperti mineralisasi N dan nitrifikasi NH_4 sangat berkaitan erat dengan retensi air karena proses tersebut butuh kondisi tanah yang lembap namun tidak tergenang. Selain itu retensi air juga dapat meningkatkan mobilitas nitrogen di tanah (Brady dan Weil, 2016). Adapun proses mineralisasi nitrogen terdiri dari beberapa tahapan, salah satunya adalah proses amonifikasi (Ferretti *et al.*, 2021). Proses ini dimulai dengan deaminasi asam amino, di mana senyawa asam amino ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$) mengalami pemecahan menjadi asam piruvat (CH_3COCOOH) dan amonia (NH_3). Selanjutnya, amonia yang terbentuk akan bereaksi dengan air (H_2O) dan menghasilkan ion amonium (NH_4^+) serta ion hidroksida (OH^-) (Yu *et al.* 2021). Tahapan ini penting dalam siklus nitrogen karena mengubah nitrogen organik menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman.

3.3 P-tersedia pada tanah

Hasil uji kehomogenan ragam terhadap analisis P-tersedia menunjukkan data homogen. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa interaksi antara pemberian limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit pada berbagai dosis berpengaruh sangat nyata terhadap konsentrasi P-tersedia pada tanah Ultisol. Hasil uji nilai tengah (Gambar 3) menunjukkan kombinasi limbah *decanter solid* 10 t ha^{-1} + abu boiler kelapa sawit 10 t ha^{-1} (S2A2) berbeda nyata meningkatkan konsentrasi P-tersedia tanah terhadap kontrol namun tidak berbeda nyata terhadap perlakuan kombinasi limbah *decanter solid* 5 t ha^{-1} + abu boiler kelapa sawit 10 t ha^{-1} (S1A2).

Interaksi signifikan antara limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit terhadap peningkatan konsentrasi fosfor tersedia (P-tersedia) pada tanah Ultisol diduga disebabkan oleh sifat kimia kedua bahan tersebut yang saling melengkapi. Limbah *decanter solid* merupakan residu organik dari industri kelapa sawit yang kaya akan bahan organik dan unsur hara makro-mikro, termasuk fosfor dalam bentuk organik (Jacob *et al.*, 2021). Sementara itu, abu boiler mengandung fosfor dalam bentuk anorganik serta kation-kation basa seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+ yang dapat meningkatkan pH tanah masam seperti Ultisol. Peningkatan pH tanah ini berperan penting dalam melepaskan fosfor dari kompleks ikatan dengan Al dan Fe yang lazim terbentuk di tanah Ultisol, sehingga meningkatkan ketersediaannya bagi tanaman. Hal ini sejalan dengan temuan Peng *et al.* (2023), yang menyatakan bahwa peningkatan pH tanah dapat mengurangi fiksasi P oleh Al dan Fe oksida. Oleh karena itu, aplikasi kombinasi bahan organik dan amelioran anorganik seperti abu boiler dapat menjadi strategi efektif dalam memperbaiki kesuburan tanah Ultisol yang secara alami memiliki tingkat P-tersedia yang rendah.



Gambar 3. Pengaruh pemberian limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit terhadap perubahan pH tanah. Diagram batang yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan berdasarkan uji nilai tengah DMRT 5%.

Perlakuan kombinasi limbah *decanter solid* 5 t ha^{-1} dan abu boiler kelapa sawit 10 t ha^{-1} merupakan perlakuan dosis terbaik yang dapat meningkatkan konsentrasi P-tersedia dengan rerata hingga 12,16 ppm jika dibandingkan dengan kontrol dan perlakuan lainnya. Pemberian perlakuan kombinasi limbah *decanter solid* 5 t ha^{-1} dan abu boiler kelapa sawit 10 t ha^{-1} pada tanah dapat meningkatkan konsentrasi P-tersedia dibandingkan tanah tanpa perlakuan (kontrol) karena kombinasi perlakuan tersebut dapat meningkatkan pH serta mengandung bahan

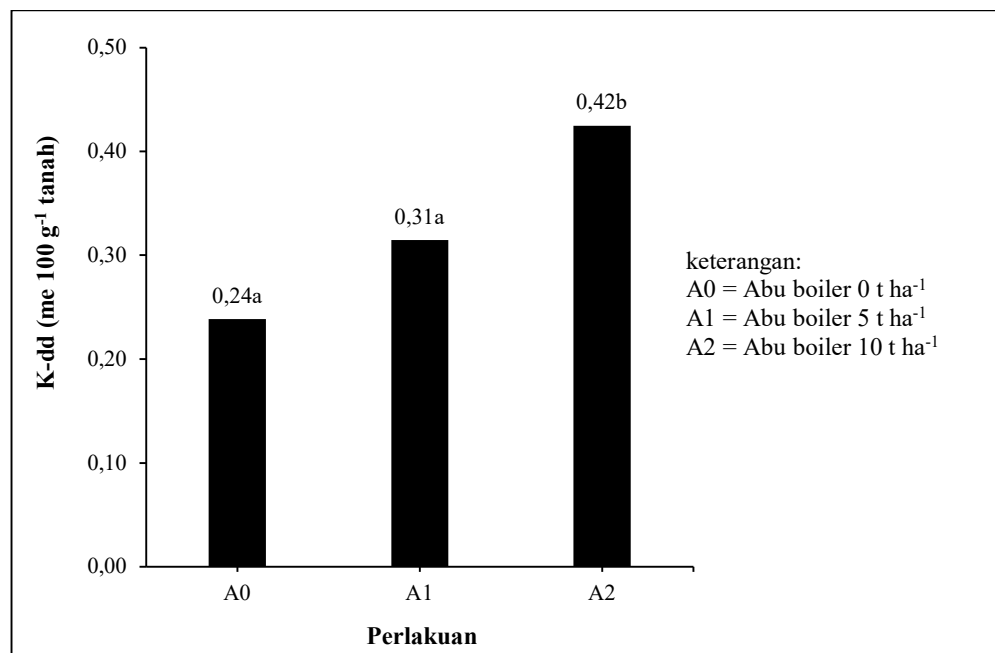
organik dan fosfor. Limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit dapat meningkatkan konsentrasi P-tersedia pada tanah karena kandungan fosfor pada abu boiler kelapa sawit serta masih berkaitan dengan peningkatan pH tanah oleh kombinasi perlakuan tersebut. Pada pH tanah yang mendekati netral (6–7), P berada dalam bentuk yang lebih tersedia (seperti H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-}). Pada rentang pH 6–7, fosfat tidak banyak bereaksi dengan besi, aluminium, atau kalsium sehingga tetap tersedia di larutan tanah.

Selain itu, peningkatan P-tersedia akibat perlakuan kombinasi ini juga berkaitan erat dengan dinamika mineralisasi dan pelapukan bahan organik dari limbah *decanter solid* yang melepaskan fosfor secara bertahap ke dalam tanah. Bahan organik ini berperan sebagai agen pengompleks ion Al^{3+} dan Fe^{3+} yang biasanya mengikat fosfat, sehingga mencegah terbentuknya senyawa fosfat yang tidak larut (Riza *et al.*, 2024). Di sisi lain, abu boiler sebagai amelioran basa turut berkontribusi dalam menetralkan keasaman tanah, sehingga mempercepat transformasi fosfor organik menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap tanaman. Menurut Oyetunji *et al.* (2022), penggabungan bahan organik dan amelioran anorganik terbukti mampu memperbaiki sifat kimia tanah secara sinergis, termasuk meningkatkan ketersediaan hara seperti fosfor. Oleh karena itu, dosis kombinasi 5 t ha^{-1} limbah *decanter solid* dan 10 t ha^{-1} abu boiler menjadi optimal karena mampu menciptakan kondisi kimia tanah yang mendukung pelarutan dan retensi fosfat dalam bentuk yang tersedia tanpa menyebabkan kelebihan garam atau gangguan keseimbangan unsur hara lainnya.

Peningkatan pH tanah menyebabkan terjadinya reaksi dominan fosfor (P) dalam bentuk perubahan spesies kimia, yakni dari H_2PO_4^- menjadi HPO_4^{2-} disertai pelepasan ion H^+ (Johan *et al.*, 2021). Kation basa yang berasal dari mineral dapat ditukar, seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}), akan menggantikan ion hidrogen (H^+) dan aluminium (Al^{3+}) dari kompleks pertukaran kation di dalam tanah. Proses ini akan meningkatkan pH tanah. Seiring meningkatnya pH, kelarutan Al^{3+} menurun (Alshareef *et al.*, 2024), sehingga kemampuan ion Al^{3+} dalam mengikat fosfat juga menurun. Akibatnya, ketersediaan fosfor di dalam tanah menjadi lebih tinggi dan lebih mudah diserap oleh tanaman (Ding *et al.*, 2021).

3.4 K-dd pada tanah

Hasil uji kehomogenan ragam terhadap konsentrasi K-dd menunjukkan data homogen. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa interaksi antara pemberian kombinasi limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit pada berbagai dosis tidak berpengaruh terhadap konsentrasi K-dd pada tanah Ultisol, namun hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pemberian abu boiler kelapa sawit berpengaruh sangat nyata terhadap konsentrasi K-dd pada tanah Ultisol. Hasil uji nilai tengah (gambar 4) menunjukkan perlakuan abu boiler 10 t ha^{-1} (A2) berbeda nyata meningkatkan konsentrasi K-dd tanah terhadap perlakuan lainnya.



Gambar 4. Pengaruh pemberian limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit terhadap perubahan pH tanah. Diagram batang yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan berdasarkan uji nilai tengah DMRT 5%.

Peningkatan pH tanah memberikan pengaruh signifikan terhadap ketersediaan fosfor (P), terutama melalui perubahan spesies kimianya dan dinamika reaksi ion dalam tanah. Pada pH rendah (masam), fosfor dominan berada dalam bentuk dihidrogen fosfat (H_2PO_4^-), yang relatif lebih stabil dalam kondisi asam. Namun, seiring peningkatan pH menuju netral hingga alkalis, spesies ini mengalami disosiasi menjadi bentuk hidrogen fosfat (HPO_4^{2-}) dengan pelepasan ion H^+ menurut reaksi: $\text{H}_2\text{PO}_4^- \rightleftharpoons \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}^+$. Proses ini mencerminkan bahwa spesiasi fosfat bersifat pH-dependent, dan bentuk HPO_4^{2-} menjadi lebih dominan pada pH di atas 7 (Saentho *et al.*, 2022). Ketersediaan fosfor juga sangat dipengaruhi oleh keberadaan ion aluminium (Al^{3+}) dan besi (Fe^{3+}), yang dalam kondisi asam cenderung membentuk senyawa fosfat tidak larut (misalnya AlPO_4), sehingga P menjadi terfiksasi dan tidak tersedia bagi tanaman.

Peningkatan pH tanah umumnya dicapai melalui proses ameliorasi, seperti aplikasi kapur pertanian (CaCO_3) atau dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), yang mengandung kation basa seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}). Kation-kation ini menggantikan ion H^+ dan Al^{3+} pada kompleks pertukaran kation tanah, mengurangi keasaman dan meningkatkan pH tanah. Reaksi pertukaran tersebut dapat digambarkan secara umum sebagai: $[\text{X}-\text{H}^+] + \text{Ca}^{2+} \rightarrow [\text{X}-\text{Ca}^{2+}] + \text{H}^+$, serta $[\text{X}-\text{Al}^{3+}] + \text{Ca}^{2+} \rightarrow [\text{X}-\text{Ca}^{2+}] + \text{Al}^{3+}$, di mana X melambangkan koloid tanah bermuatan negatif (Daba, 2024). Dengan meningkatnya pH, kelarutan Al^{3+} menurun drastis, sehingga menurunkan potensinya dalam mengikat fosfat menjadi bentuk yang tidak larut (Rukisah *et al.*, 2025). Akibatnya, konsentrasi P dalam larutan tanah meningkat, membuatnya lebih tersedia dan dapat diserap oleh akar tanaman. Oleh karena itu, pengelolaan pH tanah menjadi salah satu strategi penting dalam meningkatkan efisiensi pupuk fosfat, khususnya di tanah-tanah tropis yang memiliki kapasitas fiksasi P tinggi.

4. Kesimpulan

Interaksi perlakuan kombinasi limbah *decanter solid* dan abu boiler kelapa sawit terbukti mampu memperbaiki sifat kimia tanah Ultisol, khususnya dalam meningkatkan nilai pH tanah, konsentrasi nitrogen mineral (N-mineral), dan fosfor tersedia (P-tersedia). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan limbah *decanter solid* 10 t ha⁻¹ dan abu boiler kelapa sawit 5 t ha⁻¹ (S2A1) merupakan dosis terbaik yang mampu meningkatkan pH tanah hingga rerata 6,21; N-mineral hingga rerata 3,84 mg kg⁻¹; dan P-tersedia hingga rerata 6,25 mg kg⁻¹. Namun demikian, kombinasi perlakuan tersebut tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan maupun penurunan kadar kalium dapat ditukar (K-dd) pada tanah Ultisol. Sebaliknya, perlakuan tunggal abu boiler kelapa sawit dengan dosis 10 t ha⁻¹ (A2) menjadi perlakuan paling efektif dalam meningkatkan kadar K-dd, dengan nilai rerata mencapai 0,42 me 100 g⁻¹ tanah. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan limbah industri kelapa sawit, baik secara tunggal maupun kombinasi, memiliki potensi besar sebagai amelioran untuk memperbaiki kesuburan tanah Ultisol secara berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak PT. Perkebunan Nusantara XIII yang telah mengizinkan penulis memanfaatkan limbah kelapa sawitnya untuk dipakai dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Abdillah, M.H., Aldi, M. 2020. Aplikasi limbah padat karet remah pada tanah podsolik merah kuning terhadap ketersediaan hara makro dan perbaikan sifat fisika tanah. *EnciroScientiae* 16(2), 264–275. <https://dx.doi.org/10.20527/es.v16i2.9658>
- Ahmad, N.M., Foo, N.S., Loh, S.K., Abbas, K., Ong, S. K., Hassan, N., Al-Kharki, A.F.M., Bello, M.M., Bachmann, R.T. 2023. Nutrient recovery from anaerobic palm oil mill effluent using palm kernel shell biochar and deoiled spent bleaching earth and their effect on oil palm growth. I In: Ismail, A., Nur Zulkipli, F., Husin, H.S., Öchsner, A. (eds) *Advancements in Materials Science and Technology Led by Women. Advanced Structured Materials*, 165. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21959-7_7
- Alshareef, F.M., Algethami, J.S., Alhamami, M.A., Alosaimi, E.H., Al-Saidi, H.M., Khan, S. 2024. Recent advancement in organic fluorescent and colorimetric chemosensors for the detection of Al^{3+} ions: A review (2019–2024). *Journal of Environmental Chemical Engineering* 114110. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114110>
- Auliadesti, V. 2025. Pengaruh penambahan biochar kulit kopi dan abu valkanis dalam memperbaiki sifat kimia ultisol. *Journal Arunasita* 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15315325>
- Angst, G., Pokorný, J., Mueller, C.W., Prater, I., Preusser, S., Kandeler, E., Meador, A., Straková, P., Hájek, T., van Buiten, G., Angst, Š. 2021. Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation. *Soil Biology and Biochemistry* 159, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108302>

- Bian, H., Ma, Y., Ji, P., Zhang, G., Liu, Z., Chu, Y., Zhang, J. 2025. Effect of enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) combined with biochar on lead-contaminated soil solidification and plant growth. Journal of Environmental Chemical Engineering 13(3), 116977. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116977>
- Brady, N.C., Weil, R.R. 2016. The Nature and Properties of Soils, 15th edition, Pearson Education Publisher. Maryland. Retrieved from <http://lccn.loc.gov/2016008568>
- Chan, Y.J., Lee, H.W., Selvarajoo, A. 2021. Comparative study of the synergistic effect of decanter cake (DC) and empty fruit bunch (EFB) as the co-substrates in the anaerobic co-digestion (ACD) of palm oil mill effluent (POME). Environmental Challenges 5, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100257>
- Chu, C., Dai, S., Meng, L., Cai, Z., Zhang, J., Müller, C. 2023. Biochar application can mitigate NH₃ volatilization in acidic forest and upland soils but stimulates gaseous N losses in flooded acidic paddy soil. Science of the Total Environment 864, 161099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161099>
- Daba, A. 2024. Review on minerals transformation and cycling of basic cations in soil systems. SSRN, 2024. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5167028>
- Ding, W., Cong, W.F., Lambers, H. 2021. Plant phosphorus-acquisition and-use strategies affect soil carbon cycling. Trends in Ecology & Evolution 36(10), 899–906. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.005>
- Embrandiri, A., Rupani, P.F., Ismail, S.A., Singh, R.P., Ibrahim, M.H., Abd. Kadir, M.O. 2016. The effect of oil palm decanter cake on the accumulation of nutrients and the stomatal opening of *Solanum melongena* brinjal plants. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture 5(2), 141–147. <http://dx.doi.org/10.1007/s40093-016-0124-8>
- Ferretti, G., Galamini, G., Deltedesco, E., Gorfer, M., Fritz, J., Faccini, B., Mentler, A., Zechmeister-Boltenstren, S., Coltorti, M., Keiblinger, K.M. 2021. Gross ammonification and nitrification rates in soil amended with natural and NH₄-enriched chabazite zeolite and nitrification inhibitor DMPP. Applied Sciences 11(6), 2605. <https://doi.org/10.3390/app11062605>
- H-Kittikun, A., Cheirsilp, B., Sohsomboon, N., Binmarn, D., Pathom-Aree, W., Srinuanpan, S. 2021. Palm oil decanter cake wastes as alternative nutrient sources and biomass support particles for production of fungal whole-cell lipase and application as low-cost biocatalyst for biodiesel production. Processes 9(8), 1365. <https://doi.org/10.3390/pr9081365>
- Hardjowigeno, S. 2007. Ilmu Tanah, Akademika Pressindo, Jakarta.
- Harefa, D.F.C., Zebua, M. 2024. Peran kapasitas tukar kation dalam mempertahankan kesuburan tanah pada berbagai jenis tekstur tanah. Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan 1(1), 165–170. <https://doi.org/10.70134/penarik.v2i3.88>
- Hariana, H., Karuana, F., Putra, H.P., Ghazidin, H., Kuswa, F.M., Prismantoko, A., Raksodewanto, A.A., Maksur, Z., Wijayanto, T., Vuthaluru, H.B. 2024. Low temperature combustion and ash deposition characteristics of palm oil and forest replanting waste. Journal of Cleaner Production 477, 143851. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143851>
- Herwitarahman, A., Adwiyani, P. 2025. Teknik pengelolaan lahan sulfat masam di Kalimantan Barat untuk mendukung ketahanan pangan nasional. Jurnal AgroSainTa: Widyaishwara Mandiri Membangun Bangsa 9(1), 6–17. <https://doi.org/10.51589/fbyt7s46>
- Huang, J., Liu, W., Yang, S., Yang, L., Peng, Z., Deng, M., Xu, S., Zhang, B., Ahirwal, J., & Liu, L. 2021. Plant carbon inputs through shoot, root, and mycorrhizal pathways affect soil organic carbon turnover differently. Soil Biology and Biochemistry 160, 108322. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108322>
- Ifansyah, H. 2008. Prosedur Analisis Tanah, Jaringan Tanaman, dan Pupuk. Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru.
- Imran, I., Mustaka, Z.D. 2020. Identifikasi kandungan kapang dan bakteri pada limbah padatan (*decanter solid*) pengolahan kelapa sawit untuk pemanfaatan sebagai pupuk organik. Agrokompleks 20(1), 16–21. <https://doi.org/10.51978/japp.v20i1.196>
- Jacob, A., Ashok, B., Alagumalai, A., Chyuan, O.H., Le, P.T.K. 2021. Critical review on third generation micro algae biodiesel production and its feasibility as future bioenergy for IC engine applications. Energy Conversion and Management 228, 113655. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113655>
- Johan, P.D., Ahmed, O.H., Omar, L., Hasbullah, N.A. 2021. Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash. Agronomy 11(10), 2010. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102010>
- Kannan, P., Paramasivan, M., Marimuthu, S., Swaminathan, C. 2021. Applying both biochar and phosphobacteria enhances *Vigna mungo* L. growth and yield in acid soils by increasing soil pH, moisture content, microbial growth and P availability. Agriculture, Ecosystems & Environment 308, 107258. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107258>

- Khan, M.J., Qasim, M. 2008. Integrated use of boiler ash as organic fertilizer and soil conditioner with NPK in calcareous soil. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 30(3), 281–289. Retrieved from <http://www.sjst.psu.ac.th/>
- Legasari, L. 2024. Analisis kadar nitrogen total pada pupuk urea menggunakan metode Kjeldahl di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang. Sains: Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia 13(1), 6–11. <https://doi.org/10.36709/sains.v13i1.52>
- Mahbub, M. 2021. Program aplikasi Excel Anova v.4. Retrieved from <http://mmahbub.wordpress.com/>
- Mulya, A.H., Irianto, I., Ermadani, E. 2025. Pemberian solid decanter dan pupuk P terhadap pertumbuhan dan hasil bawang merah (*Allium ascalonicum* L.) di tanah ultisol. Jurnal Media Pertanian 10(1), 23–32. <http://doi.org/10.33087/jagro.v10i1.259>
- Oyetunji, O., Bolan, N., Hancock, G. 2022. A comprehensive review on enhancing nutrient use efficiency and productivity of broadacre (arable) crops with the combined utilization of compost and fertilizers. Journal of Environmental Management 317, 115395. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115395>
- Paramisparam, P., Ahmed, O.H., Omar, L., Ch'ng, H.Y., Johan, P.D., Hamidi, N.H. 2021. Co-application of charcoal and wood ash to improve potassium availability in tropical mineral acid soils. Agronomy 11(10), 2081. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102081>
- Peng, Y., Chen, Q., Guan, C. Y., Yang, X., Jiang, X., Wei, M., Tan, J., Li, X. 2023. Metal oxide modified biochars for fertile soil management: Effects on soil phosphorus transformation, enzyme activity, microbe community, and plant growth. Environmental Research 231, 116258. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116258>
- Pitaloka, T.O., Saidy, A.R., Yusran, F.H. 2023. Peningkatan pH dengan pemberian bahan organik pada pengelolaan air asam tambang menggunakan metode passive treatment. Acta Solum 2(1), 13–20. <https://doi.org/10.20527/actasolum.v2i1.2275>
- Purwanto, S., Gani, R.A., Suryani, E. 2021. Characteristics of ultisols derived from basaltic andesite materials and their association with old volcanic landforms in Indonesia. SAINS TANAH-Journal of Soil Science and Agroclimatology 17(2), 135–143. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v17i2.38301>
- Riza, M., Grieger, K.D., Horgan, M.D., Burkholder, J.M., Jones, J.L. 2024. Environmental impacts of selected metal cations for phosphorus capture in natural waters: A synthesis. Chemosphere 143162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143162>
- Rukisah, R., Sukardi, S., Lembang, M.S., Hutapea, T.P.H. 2025. Analisis hubungan kualitas tanah terhadap produksi tambak di Pulau Mangkudulis Kabupaten Tana Tidung, Provinsi Kalimantan Utara. Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik 9(1), 1–14. <http://doi.org/10.46252/jsai-fpik-unipa.2025.Vol.9.No.1.443>
- Rupani, P.F., Embrandiri, A., Rezania, S., Shao, W., Domínguez, J., Appels, L. 2022. Changes in the microbiota during biological treatment of palm oil mill waste: A critical review. Journal of Environmental Management 320, 115772. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115772>
- Saentho, A., Wisawapipat, W., Lawongsa, P., Aramrak, S., Prakongkep, N., Klysubun, W., Christl, I. 2022. Speciation and pH-and particle size-dependent solubility of phosphorus in tropical sandy soils. Geoderma 408, 115590. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115590>
- Sardar, M.F., Younas, F., Farooqi, Z.U.R., Li, Y. 2023. Soil nitrogen dynamics in natural forest ecosystem: A review. Frontiers in Forests and Global Change 6, 1144930. <http://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1144930>
- Simanjuntak, P., Panataria, L.R., Hutagaol, A., Saragih, M.K., Sitorus, E. 2024. Pengaruh pemberian abu boiler dan pupuk kandang ayam terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman bawang merah (*Allium cepa* L.). Jurnal Methodagro 10(1), 28-42. <https://doi.org/10.46880/mtg.v10i1.3179>
- Siregar, L.R., Duaja, M.D. 2025. Pengaruh kombinasi kompos dekanter solid dan konsentrasi asam humat cair terhadap pertumbuhan bibit duku (*Lansium domesticum* Corr). Jurnal Agroecotania: Publikasi Nasional Ilmu Budidaya Pertanian 8(1), 13-27. <https://doi.org/10.22437/agroecotania.v8i1.43622>
- Sothe, C., Gonsamo, A., Arabian, J., Snider, J. 2022. Large scale mapping of soil organic carbon concentration with 3D machine learning and satellite observations. Geoderma 405, 115402. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115402>
- Sposito, G. 2008. The Chemistry of Soils, 2nd edition, Oxford University Press.
- Suan, J.D.K., Datta, A., Salam, P.A. 2017. Effect of oil palm fly ash on soil properties and yield of sweet corn in the tropical zone of Thailand. Communications in Soil Science and Plant Analysis 48(2), 236–244. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1269791>
- Suharta, N. 2010. Karakteristik dan permasalahan tanah marginal dari batuan sedimen masam di Kalimantan. Jurnal Litbang Pertanian 29(4), 139–146. Retrieved from <https://repository.pertanian.go.id/server/api/core/bitstreams/23604772-5483-4355-acf5-dabaf48ec60/content>

- Wang, C., Sun, H., Zhang, J., Zhang, X., Lu, L., Shi, L., Zhou, S. 2021. Effects of different fertilization methods on ammonia volatilization from rice paddies. *Journal of Cleaner Production* 295, 126299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126299>
- Yu, L., Zheng, T., Hao, Y., Zheng, X. 2021. Determination of the nitrogen isotope enrichment factor associated with ammonification and nitrification in unsaturated soil at different temperatures. *Environmental Research* 202, 111670. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111670>