



Pengaruh Porosit Tanah di Dieng terhadap Dinamika Zat Hara dan Racun dari Pupuk Organik

Nisa Zus Hariahya¹, Lathifa Zusra², Mawar Lu'luul Fuadah³, Muhammad Lutfan Hakim⁴, Nugroho Prasetya Adi⁵

^{1,2,3,4,5} Prodi Pendidikan Fisika, Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Sains Al-Qur'an, Jln. KH. Hasyim As'ari, Km. 03, Kalibebber, Mojotengah, Wonosobo

Email : lutfans@gmail.com

Article Info

Article history:

Received July 14, 2025

Revised July 16, 2025

Accepted July 29, 2025

Keywords:

Dieng, Zat Hara, Racun, Pupuk Organik

ABSTRACT

Dieng is known for its unique microclimate and relatively fertile volcanic soils. However, over the past two decades, various studies and farmers' reports have indicated a significant decline in agricultural productivity. This study aims to explore the relationship between soil porosity characteristics, nutrient dynamics, and the potential toxicity resulting from the use of organic fertilizers in the agricultural lands of the Dieng Plateau. The method employed is a literature review. The findings show that soils in the Dieng Plateau are predominantly composed of regosol, alluvial, and andosol types, each with different porosity characteristics that affect the movement of nutrients and toxins within the soil. High porosity in regosol leads to rapid leaching of nutrients and toxins, especially during periods of high rainfall and low temperatures. In contrast, andosol and alluvial soils tend to retain water and nutrients for longer periods; however, the release of nutrients may be hindered by low temperatures that suppress microbial activity. The movement of substances through the soil occurs through advection and diffusion processes, which are influenced by pore structure, water pressure, and soil permeability.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received July 14, 2025

Revised July 16, 2025

Accepted July 29, 2025

Kata Kunci :

Dieng, Zat Hara, Racun, Pupuk Organik

ABSTRAK

Dieng dikenal dengan kondisi iklim mikro yang unik, serta tanah vulkanik yang relatif subur. Namun, dalam dua dekade terakhir, berbagai penelitian dan laporan petani menunjukkan adanya penurunan produktivitas pertanian yang cukup signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji lebih dalam mengenai hubungan antara karakteristik porositas tanah dengan dinamika zat hara dan potensi racun yang dihasilkan dari penggunaan pupuk organik di lahan pertanian Dataran Tinggi Dieng. Metode yang digunakan adalah literature review. Hasil penelitian menunjukan bahwa Tanah di Dataran Tinggi Dieng didominasi oleh regosol, aluvial, dan andosol yang memiliki karakteristik porositas berbeda, sehingga memengaruhi pergerakan zat hara dan racun dalam tanah. Porositas tinggi pada regosol menyebabkan nutrisi dan racun dari pupuk organik mudah tercuci, terutama saat curah hujan tinggi dan suhu rendah. Sebaliknya, andosol dan aluvial cenderung menahan air dan unsur hara lebih lama, namun pelepasan hara bisa terhambat oleh suhu dingin yang menurunkan aktivitas mikroba. Pergerakan zat melalui tanah terjadi melalui proses adveksi dan difusi, yang dipengaruhi oleh struktur pori, tekanan air, dan permeabilitas tanah.



This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Nisa Zus Hariahya

*Universitas Sains Al-Qur'an*E-mail: lutffans@gmail.com

PENDAHULUAN

Dataran Tinggi Dieng merupakan salah satu kawasan agroekosistem penting di Indonesia, terutama dalam pengembangan pertanian hortikultura seperti kentang, kubis, wortel, dan berbagai jenis sayuran dataran tinggi lainnya. Kawasan ini dikenal dengan kondisi iklim mikro yang unik, serta tanah vulkanik yang relatif subur. Namun, dalam dua dekade terakhir, berbagai penelitian dan laporan petani menunjukkan adanya penurunan produktivitas pertanian yang cukup signifikan. Salah satu faktor utama yang diidentifikasi adalah perubahan iklim yang memicu kejadian cuaca ekstrem, khususnya embun beku (frost) yang sering terjadi pada bulan Juli dan Agustus (Turasih, 2016). Cuaca ekstrem semacam ini telah menyebabkan kerusakan jaringan tanaman, menghambat aktivitas fotosintesis, serta menurunkan efisiensi penyerapan air dan unsur hara oleh akar tanaman. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut berkontribusi terhadap menurunnya hasil panen dan memperbesar risiko gagal panen (Servina, 2019). Selain cuaca yang ekstrem, permasalahan ekologis yang disebabkan oleh praktik pertanian intensif juga turut memperburuk kondisi tanah di wilayah ini.

Salah satu aspek yang perlu mendapatkan perhatian serius adalah praktik pertanian intensif yang tidak ramah lingkungan. Budidaya kentang sebagai komoditas utama mendorong petani untuk menggunakan pupuk kimia dan pestisida secara masif. Dampak jangka panjang dari praktik ini adalah terjadinya degradasi kualitas tanah, mulai dari penurunan kadar bahan organik, ketidakseimbangan pH, pencemaran air tanah, hingga kerusakan struktur fisik tanah (Anata, 2025). Tanah yang tercemar dan padat cenderung memiliki porositas rendah, sehingga mengganggu sirkulasi udara dan pergerakan air dalam profil tanah. Penurunan porositas ini tidak hanya menurunkan kapasitas tanah dalam mendukung pertumbuhan akar, tetapi juga mempercepat akumulasi senyawa kimia beracun di zona perakaran. Dalam kondisi ini, efisiensi penyerapan hara menjadi rendah dan dapat menyebabkan penumpukan racun yang berdampak buruk bagi tanaman maupun organisme tanah.

Keberadaan mikroorganisme dan fauna tanah seperti mikroartropoda merupakan indikator kesehatan tanah yang penting. Peningkatan intensifikasi pertanian dan akumulasi input sintetis secara berlebihan terbukti mengurangi keanekaragaman hayati mikrofauna tanah, termasuk mikroartropoda, yang memiliki peran kunci dalam dekomposisi bahan organik dan daur ulang unsur hara (Shiddiq et al., 2020). Ketika populasi mikroartropoda menurun, proses pelapukan bahan organik menjadi terganggu, dan pada saat yang sama terjadi akumulasi racun akibat tidak efektifnya degradasi senyawa kimia di dalam tanah. Hal ini berimplikasi pada terganggunya dinamika zat hara dan residu racun, khususnya dalam sistem pertanian berbasis pupuk organik.

Dalam upaya perbaikan kualitas tanah dan keberlanjutan agroekosistem Dieng, penggunaan pupuk organik menjadi alternatif yang semakin banyak diterapkan. Namun,



efektivitas pupuk organik sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik tanah, terutama porositas. Porositas tanah menentukan sejauh mana air, udara, dan mikroba dapat bergerak dan berinteraksi di dalam tanah. Tanah dengan porositas yang baik memungkinkan zat hara dari pupuk organik dapat terdifusi dengan optimal ke zona perakaran tanaman, serta mempermudah aktivitas mikroba pengurai bahan organik. Sebaliknya, tanah yang memiliki porositas rendah dapat menyebabkan genangan, pembentukan gas beracun seperti amonia, serta akumulasi senyawa fitotoksik dari hasil dekomposisi yang tidak sempurna.

Oleh karena itu, diperlukan kajian yang lebih mendalam mengenai hubungan antara karakteristik porositas tanah dengan dinamika zat hara dan potensi racun yang dihasilkan dari penggunaan pupuk organik di lahan pertanian Dataran Tinggi Dieng. Penelitian ini penting untuk merumuskan strategi pengelolaan tanah secara berkelanjutan serta mendukung keberhasilan pertanian organik yang tidak hanya produktif tetapi juga ramah lingkungan. Dengan demikian, keberlanjutan agroekosistem Dieng dapat terjaga, baik dari aspek ekologi, sosial, maupun ekonomi petani setempat.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif berbasis studi literatur (literature review) yang bertujuan untuk menelaah secara mendalam dinamika zat hara dan potensi racun dari pupuk pertanian dalam tanah, dengan fokus utama pada peran porositas tanah di wilayah Dataran Tinggi Dieng. Pendekatan ini dipilih untuk menggali konsep-konsep teoretis, temuan empiris, dan kecenderungan hasil-hasil penelitian terkini yang relevan dengan topik kajian. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran dokumen ilmiah, seperti artikel jurnal nasional dan internasional terakreditasi, prosiding konferensi ilmiah, buku referensi akademik, serta laporan penelitian yang relevan (Abdussamad., 2021; Syaiful Anam., 2023). Penelusuran dilakukan secara daring melalui basis data seperti Google Scholar, ScienceDirect, Springer, dan DOAJ, dengan menggunakan kata kunci seperti soil porosity, nutrient leaching, organic fertiliser, regosol soil, dan soil permeability. Literatur yang dikaji dipilih berdasarkan rentang waktu publikasi antara tahun 2015 hingga 2025, dengan prioritas pada karya-karya ilmiah yang membahas interaksi antara pupuk organik dan karakteristik fisik tanah, terutama terkait mekanisme pergerakan zat melalui adveksi dan difusi, serta pengaruh porositas tanah terhadap efisiensi penggunaan pupuk dan risiko pencucian unsur hara.

Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kualitatif dengan pendekatan tematik. Proses analisis dilakukan dengan cara mengelompokkan informasi ke dalam beberapa tema utama, yaitu: jenis tanah (seperti regosol, andosol, aluvial), karakteristik pori tanah (porositas total dan efektif), serta dinamika mobilitas zat hara dan racun dalam tanah. Informasi dari berbagai sumber disintesis untuk melihat keterkaitan antara struktur pori tanah dan pergerakan zat terlarut, terutama dalam konteks penggunaan pupuk organik di sistem pertanian hortikultura dataran tinggi seperti Dieng. Beberapa studi terdahulu menunjukkan bahwa pengolahan tanah dalam jangka panjang secara signifikan memengaruhi porositas dan distribusi agregat tanah, yang pada akhirnya berdampak terhadap kemampuan tanah dalam menyimpan dan menyalurkan air serta zat hara terlarut (Yang et al., 2021). Selain itu, praktik pengelolaan nutrisi dan sistem olah tanah memiliki implikasi langsung terhadap perubahan struktur pori tanah dan efisiensi penyerapan pupuk dalam sistem pertanian lahan kering (Mateo-Marin et al., 2021).



HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kondisi tanah di dataran tinggi dieng

Dataran Tinggi Dieng memiliki karakteristik tanah yang dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik, sehingga didominasi oleh jenis tanah regosol, aluvial, serta asosiasi andosol dan regosol (Aprillia Findayani dkk, 2024) (Aulia Putri Nurjannah dkk, 2025) (Ari Pujiwinarko dkk, 2023) (Ari Pujiwinarko dkk, 2024). Tanah regosol terbentuk dari material vulkanik muda seperti abu dan pasir yang belum mengalami pelapukan lanjut, sehingga bersifat gembur dan lepas (N Charibaldi dkk, 2022) (Lingling Ji dkk, 2024). Meskipun regosol dapat mendukung kesuburan tanah secara potensial, kondisi ini rentan terhadap pencucian karena struktur tanahnya yang longgar dan curah hujan tinggi di kawasan tersebut. Di sisi lain, tanah aluvial banyak ditemukan di daerah dataran, terutama sepanjang aliran sungai dan sekitar Danau Balekambang. Tanah ini terbentuk dari endapan halus yang terbawa air dan cenderung memiliki struktur yang lebih stabil dan subur (Linee Goswasmi dkk, 2024) (Sufyan Ghani & Sunita Kamari, 2023). Tanah dengan struktur gumpal umumnya lebih tahan terhadap benturan dan erosi dibandingkan tanah yang strukturnya gembur, seperti pada andosol dan regosol yang mudah tererosi oleh aliran air permukaan. Kombinasi dari faktor geologi vulkanik, curah hujan tinggi, dan kondisi topografi pegunungan menjadikan kawasan Dieng memiliki dinamika tanah yang kompleks dan memerlukan pengelolaan yang hati-hati dalam pemanfaatannya.

2. Pergerakan zat dalam tanah

Porositas tanah merupakan salah satu karakteristik fisik yang sangat penting dalam memahami perilaku air dan zat terlarut di dalam tanah (D A Robinson dkk, 2022) (Yanghui Yang dkk, 2021). Porositas menentukan seberapa banyak ruang kosong tersedia di antara partikel-partikel tanah. Hal ini menyebabkan porositas tanah dapat memengaruhi seberapa cepat air dapat meresap, tertahan, atau mengalir ke bawah permukaan (Surajit Mandal dkk, 2022) (Jocenei dfe Oliveira dkk, 2021). Porositas memiliki peran besar dalam pertanian, di mana pori-pori tanah menentukan efektivitas penyerapan air oleh akar tanaman, distribusi oksigen dalam tanah, serta retensi dan pergerakan unsur hara yang dibutuhkan tanaman (Ahmad M Abdallah dkk, 2021). Fenomena pergerakan air dan zat terlarut di dalam tanah tidak dapat dilepaskan dari prinsip dasar dalam fisika fluida, khususnya dalam konteks aliran fluida melalui medium berpori. Salah satu teori utama yang digunakan untuk menjelaskan proses ini adalah Hukum Darcy, yang dirumuskan oleh Henry Darcy pada abad ke-19 (Shareen S Singal dkk, 2021). Secara matematis, hukum ini dinyatakan sebagai:

$$Q = -k.A.\frac{dH}{dL}$$

Dimana ; Q = debit Aliran

k = Koefisien Permeabilitas

A = Luas Penampang Aliran

$\frac{dH}{dL}$ = Gradien Hidrolik

Porositas berperan sebagai indikator seberapa banyak ruang kosong tersedia di antara partikel tanah yang dapat diisi oleh air dan udara (N Mateo Marin dkk, 2021) (Yujiao Zhang dkk, 2021). Namun, penting untuk dibedakan antara porositas total dan porositas efektif. Porositas total mencakup semua rongga dalam tanah dan porositas efektif yakni pori-pori yang



saling terhubung—yang menentukan laju pergerakan air dan zat terlarut. Oleh karena itu, permeabilitas tanah sangat bergantung pada ukuran, distribusi, dan kontinuitas pori-pori tersebut (Rouan amami dkk, 2021) (Yitayh Leul dkk, 2023) (Hanieh Bamdad dkk, 2021) (S Iqbal dkk, 2021). Seperti tanah regosol yang memiliki pori-pori besar dan jarak antarpartikel yang renggang, sehingga permeabilitasnya tinggi. Secara fisika, ini berarti air dan zat terlarut seperti ion nitrat, fosfat, dan logam berat dari pupuk organik dapat dengan mudah masuk ke dalam pori-pori tanah dan bergerak ke bawah mengikuti gaya gravitasi dan gradien tekanan air. Kecepatan pergerakan ini meningkat secara eksponensial apabila tanah jenuh oleh curah hujan tinggi, seperti yang umum terjadi di kawasan pegunungan. Pergerakan zat terlarut dalam tanah juga dapat dijelaskan melalui mekanisme adveksi dan difusi.

Adveksi dan difusi merupakan dua mekanisme utama pergerakan zat terlarut dalam medium berpori seperti tanah (Renhao Cui dkk, 2021) (Daniel Koehn dkk, 2021) (Bo-Tao Zhu dkk, 2021) (M Hussein Saadat dkk, 2022) (Yunyun Li dkk, 2021). Adveksi adalah proses perpindahan zat terlarut yang terjadi seiring dengan aliran massa fluida (dalam hal ini air) yang melewati pori-pori tanah. Dengan kata lain, zat hara atau senyawa kimia berpindah mengikuti arah dan kecepatan aliran air, sehingga kecepatannya sangat bergantung pada debit air dan permeabilitas tanah. Sementara itu, difusi adalah proses perpindahan zat terlarut akibat perbedaan konsentrasi, di mana molekul bergerak dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi lebih rendah, tanpa perlu adanya aliran massa air.

Kombinasi dari adveksi dan difusi menyebabkan tanah berporositas tinggi seperti regosol menjadi media yang sangat dinamis dalam mendistribusikan baik unsur hara maupun senyawa toksik. Di satu sisi, ini dapat mempercepat penyerapan nutrisi oleh tanaman jika dikelola dengan baik; di sisi lain, bisa menjadi jalur cepat bagi zat racun atau kelebihan pupuk untuk masuk ke dalam air tanah jika tidak diawasi secara ketat. Sebaliknya, tanah dengan porositas lebih rendah atau struktur pori yang kompleks, seperti andosol, memiliki keunggulan dalam menahan air dan zat terlarut lebih lama di zona perakaran. Namun, jika gradien tekanan meningkat misalnya karena hujan deras atau irigasi berlebih maka hukum Darcy tetap berlaku, dan pergerakan fluida tetap terjadi dengan kecepatan yang sebanding dengan nilai koefisien dan gradien tersebut. Kedua proses ini bekerja secara bersamaan dalam tanah, terutama di wilayah akar tanaman (rizosfer), dan sangat dipengaruhi oleh struktur pori tanah, suhu, serta kelembaban (Edwan Kaskar dkk, 2025).

Suhu lingkungan juga menjadi faktor penting yang memengaruhi dinamika zat hara dan senyawa toksik di dalam tanah. Kawasan Dieng dikenal dengan suhu rata-rata harian yang rendah, terutama pada malam hari, yang dapat mencapai 10°C atau lebih rendah. Suhu dingin ini memengaruhi aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam proses dekomposisi dan mineralisasi bahan organik. Akibatnya, pelepasan unsur hara dari pupuk organik menjadi lebih lambat dibandingkan pada tanah dengan suhu hangat. Kombinasi antara suhu rendah dan tanah berporositas tinggi seperti regosol menjadi tantangan tersendiri karena selain pelepasan hara lambat, nutrisi yang terlarut tetap berisiko tercuci sebelum dimanfaatkan tanaman. Dampak suhu dingin juga dirasakan pada tanah andosol dan aluvial. Walaupun struktur tanah andosol mampu menyimpan kelembaban dan mendukung aktivitas mikroba, suhu rendah tetap menekan laju metabolisme mikroorganisme, sehingga proses mineralisasi berjalan lebih lambat. Kondisi ini harus menjadi perhatian dalam merancang strategi pemupukan, terutama terkait waktu dan



dosisi aplikasi. Salah satu bentuk praktik pemupukan yang umum dilakukan petani di Dieng adalah penggunaan pupuk organik.

Pupuk organik merupakan salah satu pupuk yang mengandung berbagai unsur hara makro dan mikro dalam bentuk senyawa organik kompleks. Ketersediaan unsur hara dari pupuk organik sangat bergantung pada proses dekomposisi dan mineralisasi oleh mikroorganisme tanah, dan proses ini juga dipengaruhi secara langsung oleh kondisi fisik tanah, terutama porositas. Misalnya, tanah regosol yang memiliki porositas tinggi struktur partikelnya yang longgar dan lepas. Kondisi ini menyebabkan air dan zat terlarut bergerak sangat cepat melalui profil tanah, meningkatkan risiko pencucian unsur hara, khususnya dalam kondisi overdosis pupuk organik. Unsur seperti nitrat (NO_3^-) dan kalium (K^+), yang sangat larut dalam air, akan mudah terbawa oleh aliran vertikal sebelum diserap oleh akar tanaman. Sebaliknya, tanah andosol menunjukkan porositas sedang dengan struktur stabil dan kaya akan mineral amorf seperti alofan, yang memiliki kemampuan adsorpsi tinggi terhadap kation dan anion. Hal ini membuat kondisi tanah dapat mempertahankan kelembaban dan unsur hara di zona akar. Namun, kelebihan pupuk tetap dapat menyebabkan kejenuhan nutrisi, terutama saat hujan intensitas tinggi melanda. Dan Tanah aluvial yang terbentuk dari endapan sungai memiliki karakteristik fisik campuran. Bergantung pada fraksi penyusunnya, tanah ini bisa memperlihatkan kemampuan retensi air dan nutrisi yang baik maupun sebaliknya. Jika drainasenya buruk, tanah aluvial bisa menjadi tempat akumulasi racun, terutama dari pupuk organik yang tidak terfermentasi dengan baik. Selain zat hara, pupuk organik juga bisa mengandung senyawa toksik, seperti logam berat atau residu pestisida dari bahan baku organik yang tidak steril.

KESIMPULAN

Tanah di Dataran Tinggi Dieng didominasi oleh regosol, aluvial, dan andosol yang memiliki karakteristik porositas berbeda, sehingga memengaruhi pergerakan zat hara dan racun dalam tanah. Porositas tinggi pada regosol menyebabkan nutrisi dan racun dari pupuk organik mudah tercuci, terutama saat curah hujan tinggi dan suhu rendah. Sebaliknya, andosol dan aluvial cenderung menahan air dan unsur hara lebih lama, namun pelepasan hara bisa terhambat oleh suhu dingin yang menurunkan aktivitas mikroba. Pergerakan zat melalui tanah terjadi melalui proses adveksi dan difusi, yang dipengaruhi oleh struktur pori, tekanan air, dan permeabilitas tanah. Oleh karena itu, pengelolaan pupuk harus disesuaikan dengan jenis tanah dan iklim setempat untuk mencegah kehilangan hara dan akumulasi racun. Pendekatan ini penting untuk mendukung pertanian berkelanjutan di wilayah Dieng.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdallah, A. M., Jat, H. S., Choudhary, M., Abdelaty, E. F., Sharma, P. C., & Jat, M. L. (2021). Conservation Agriculture Effects on Soil Water Holding Capacity and Water-Saving Varied with Management Practices and Agroecological Conditions: A Review. *Agronomy*, *11*(9), 1681. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091681>
- Abdussaamad, Z. (2021). *Metode penelitian kualitatif*. Makassar: Syakir Media Press.



- Amami, R., Ibrahimi, K., Sher, F., Milham, P., Ghazouani, H., Chehaibi, S., Hussain, Z., & Iqbal, H. M. N. (2021). Impacts of different tillage practices on soil water infiltration for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(6), 3155. <https://doi.org/10.3390/su13063155>
- Anam, S., Nashihin, H., Taufik, A., Sitompul, H. S., Manik, Y. M., Arsid, I., Jumini, S., Nurhab, M. I., Widiyastuti, N. E., & Luturmas, Y. (2023). *Metode penelitian (kualitatif, kuantitatif, eksperimen, dan R&D)*. Global Eksekutif Teknologi.
- Anata, Radite Rangi. (2025). Analisis Kerusakan Lingkungan Akibat Praktik Pertanian Kentang Intensif terhadap Objek Wisata di Kawasan Dataran Tinggi Dieng. *Jurnal Agromedia*, 43(1), 57-68.
- Bamdad, H., Papari, S., Lazarovits, G., & Berruti, F. (2022). Soil amendments for sustainable agriculture: Microbial organic fertilizers. *Soil Use and Management*, 38(1), 94–120. <https://doi.org/10.1111/sum.12762>
- Charibaldi, N., Saidi, D., Kodong. (2022). Precision Agriculture Using Internet Of Things in Regosol Soil. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 1018 (012006)
- Cui, R., Li, H., Peng, R., & Zhou, M. (2021). Concentration behavior of endemic equilibrium for a reaction–diffusion–advection SIS epidemic model with mass action infection mechanism. *Calculus of Variations and Partial Differential Equations*, 60, 184. <https://doi.org/10.1007/s00526-021-01992-w>
- Findayani, Aprillia., Ta'ani, M Qowiyl Amien., dkk. (2024). Identifikasi Natural Based Solutions Sebagai Upaya Konservasi Lahan Kritis Akibat Pertanian Kentang Di Dataran Tinggi Dieng Kecamatan Kejajar Kabupaten Wonosobo. *Indonesian Journal of Conservation*. 13 (1)
- Ghani, S., & Kumari, S. (2024). A novel tool for probabilistic modeling of liquefaction behavior in alluvial soil. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 19(1), 134–157. <https://doi.org/10.1080/17499518.2024.2395560>
- Goswasme, Line., dkk. (2024). Vermi-converted tea industry coal ash efficiently substitutes chemical fertilization for growth and yield of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) in an alluvial soil: A field-based study on soil quality, nutrient translocation, and metal-risk remediation. *Science of The Total Environment*, 922, 171180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.171180>
- Iqbal, S., Riaz, U., Murtaza, G., Jamil, M., Ahmed, M., Hussain, A., & Abbas, Z. (2021). Chemical fertilizers, formulation, and their influence on soil health. In K. R. Hakeem, G. H. Dar, M. A. Mehmood, & R. A. Bhat (Eds.), *Microbiota and biofertilizers: A sustainable continuum for plant and soil health* (pp. 1–15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3_1
- Ji, Lingling., Chen, Xiuhua., dkk. (2024). Arbuscular mycorrhizal hyphal networks and glomalin-related soil protein jointly promote soil aggregation and alter aggregate hierarchy in Calcaric Regosol. *Geoderma*. 452 (117096).
- Kaskar, E. (2025). Aplikasi model fisika tanah untuk prediksi pergerakan air dan nutrisi pada sistem pertanian modern. *Penarik: Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 1(2), 61. <https://doi.org/10.70134/penarik.v1i2.61>



- Koehn, D., Piazzolo, S., Beaudoin, N. E., Kelka, U., Spruženiece, L., Putnis, C. V., & Toussaint, R. (2021). Relative rates of fluid advection, elemental diffusion and replacement govern reaction front patterns. *Earth and Planetary Science Letters*, 565, 116950. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116950>
- Leul, Y., Assen, M., Damene, S., & Legass, A. (2023). Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators*, 147, 110024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110024>
- Li, Y., Yin, Q., Marchesoni, F., Debnath, T., & Ghosh, P. K. (2021). Advection-enhanced diffusion in biased convection arrays. *Physical Review E*, 103(3), L030106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.103.L030106>
- Mateo-Marín, N., Bosch-Serra, À. D., Molina, M. G., & Poch, R. M. (2021). Impacts of tillage and nutrient management on soil porosity trends in dryland agriculture. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13139. <https://doi.org/10.1111/ejss.13139>
- Mondal, S., & Chakraborty, D. (2022). Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. *Geoderma*, 405, 115443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>
- Nurjanah, Aulia Putri., Yanti, Ropi., dkk (2025). Persebaran Tanah Dalam Keanekaragaman Hayati Dan Kearifan Lokal Di Wilayah Indonesia. *Jurnal Pendidikan Sosial Dan Humaniora*, 4(3), 4876–4882. <https://publisherqu.com/index.php/pediaqu/article/view/2361>
- Oliveira, J. A. T., Cássaro, F. A. M., & Pires, L. F. (2021). Estimating soil porosity and pore size distribution changes due to wetting–drying cycles by morphometric image analysis. *Soil & Tillage Research*, 205, 104814. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104814>
- Pujiwinarko, Ari., dkk. (2023). The Potential of Agroforestry to Overcome Agricultural Land Degradation in the Dieng Plateau, Central Java, Indonesia. *E3S Web of Conferences*. 448 (03034).
- Pujiwinarko, Ari., dkk. (2024). Land Management And Factors Influencing Agroforestry Adoption On Potato Farmlands In The Dieng Plateau, Indonesia. *Biodeversitas*. 25 (6). 2623-2641
- Robisson, D A., dkk. (2021) Analytical modelling of soil porosity and bulk density across the soil organic matter and land-use continuum. *Scientific Repost*. 12 (7085)
- Saadat, M. H., Gjorgiev, B., Das, L., & Sansavini, G. (2022). Neural tangent kernel analysis of PINN for advection-diffusion equation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.11716>
- Servina, Yeli. (2019). Dampak Perubahan Iklim Dan Strategi Adaptasi Tanaman Buah Dan Sayuran Di Daerah Tropis. *Jurnal Litbang Pertanian*, 38(2), 65-76.
- Shiddiq, I., Rahadian, R., & Tarwotjo, U. (2020). Struktur Komunitas Mikroartropoda Tanah di Lahan Pertanian Kentang di Desa Sembungan Dataran Tinggi Dieng, Jawa Tengah. *Jurnal Biologi Tropika*, 3(1), 17-23.
- Singal, S. S., Mandagi, A. T., & Sarajar, A. N. (2021). Analisis rembesan pada dam tailing di Desa Tokin Kecamatan Motoling Timur. *Jurnal Tekno (JTS)*, 19(78). <https://doi.org/10.35793/jts.v19i78.36447>



- Turasih, Lala M. Kolopaking, & Ekawati Sri Wahyuni. (2016). Strategi Adaptasi Perubahan Iklim Pada Petani Dataran Tinggi (Studi Petani di Dataran Tinggi Dieng, Kabupaten Banjarnegara). *Sodality: Jurnal Sosiologi Pedesaan*, 4(1), 70-82.
- Yang, Y., Wu, J., Zhao, S., Mao, Y., Zhang, J., Pan, X., He, F., & van der Ploeg, M. (2021). Impact of long-term sub-soiling tillage on soil porosity and soil physical properties in the soil profile. *Land Degradation and Development*, 32(10), 2892–2905. <https://doi.org/10.1002/ldr.3874>
- Zhang, Y., Tan, C., Wang, R., Li, J., & Wang, X. (2021). Conservation tillage rotation enhanced soil structure and soil nutrients in long-term dryland agriculture. *European Journal of Agronomy*, 131, 126379. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126379>
- Zhu, B.-T., Lu, F.-W., Zhou, B., & Zhang, L. (2021). Multiband nonthermal radiative model of pulsar wind nebulae: Study of the effects of advection and diffusion. *Astronomy & Astrophysics*, 655, A41. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141042>