



Efektivitas Kombinasi Pupuk Kandang Kambing dan Pupuk Anorganik NPK dalam Meningkatkan Efisiensi Penggunaan Hara dan Hasil Jagung (*Zea mays L.*) di Tanah Ultisol

Effectiveness of Combining Goat Manure and Inorganic NPK Fertilizer in Improving Nutrient Use Efficiency and Corn (*Zea mays L.*) Yield in Ultisol Soil

Rita Hayati ^{*1}, Leony Agustine ¹, Feira Budiarsyah Arief ¹

¹ Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia

*Penulis Korespondensi

Email: rita.hayati@faperta.untan.ac.id



Abstrak. Peningkatan populasi global mendesak peningkatan produktivitas jagung di lahan sub-optimal, seperti ultisol yang masam dan miskin hara, sembari memitigasi dampak lingkungan dari pupuk anorganik. Penelitian ini bertujuan menentukan dosis kombinasi pupuk kandang kambing (pukan) dan NPK terbaik untuk meningkatkan efisiensi hara dan hasil jagung. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktor tunggal yang terdiri dari lima taraf perlakuan dan setiap taraf diulang sebanyak lima kali, sehingga diperoleh 25 satuan percobaan. Hasil menunjukkan perlakuan kombinasi (P3 dan P4) memberikan pengaruh terhadap serapan dan efisiensi hara. Secara signifikan, perlakuan P4 (50% NPK + 100% Pukan) menghasilkan serapan N tertinggi (107,64 kg N ha⁻¹), sekaligus menunjukkan efisiensi penggunaan N, P, dan K yang optimal. Keunggulan ini disebabkan oleh peran pukan yang memperbaiki sifat kimia tanah. Pukan berhasil meningkatkan pH tanah dan Kapasitas Tukar Kation (KTK), sehingga mengatasi masalah fiksasi Fosfor (P) dan pencucian Kalium (K) yang menjadi kendala utama ultisol. Secara agronomi, perlakuan P4 menghasilkan berat pipil tertinggi (3.400-3.500 kg/ha) yang setara dengan perlakuan P3. Penelitian menyimpulkan substitusi 50% dosis NPK dengan pupuk kandang kambing adalah strategi yang efisien dan berkelanjutan untuk budidaya jagung di lahan ultisol.
Kata kunci: efisiensi hara, jagung, pupuk kandang kambing, pupuk NPK, ultisol.

Abstract. Global population growth necessitates increased maize productivity on suboptimal soils, such as acidic and nutrient-poor ultisols, while mitigating the environmental impacts of inorganic fertilizers. This study aimed to determine the optimal combination of goat manure (pukan) and NPK fertilizer to improve nutrient use efficiency and maize yield. The study employed a single-factor completely randomized design (CRD) consisting of five treatment levels, each replicated five times, resulting in 25 experimental units. Results indicated that the combination treatments (P3 and P4) influenced nutrient uptake and efficiency. Significantly, treatment P4 (50% NPK + 100% Pukan) produced the highest N uptake (107.64 kg N ha⁻¹), while also demonstrating optimal N, P, and K use efficiency. This advantage was due to the role of pukan in improving soil chemical properties. Goat manure successfully increased soil pH and Cation Exchange Capacity (CEC), thereby addressing the issues of phosphorus (P) fixation and potassium (K) leaching, which are the primary constraints in Ultisols. From an agronomic perspective, treatment P4 yielded the highest grain weight (3,400–3,500 kg/ha), comparable to treatment P3. The study concluded that substituting 50% of the NPK dose with goat manure is an efficient and sustainable strategy for corn cultivation on Ultisol soils.

Keywords: *nutrient efficiency, corn, goat manure, NPK fertilizer, ultisol.*

1. Pendahuluan

Peningkatan populasi global yang terus berlanjut, menempatkan sektor pertanian di bawah tekanan luar biasa untuk meningkatkan produktivitas guna menjamin ketahanan pangan (Esmailzadeh-Salestani *et al.*, 2023). Jagung (*Zea mays* L.) merupakan komoditas sereal terpenting dunia yang berfungsi sebagai sumber pangan pokok, pakan ternak, dan bahan baku bioenergi. Di Indonesia, jagung berperan strategis sebagai sumber karbohidrat kedua setelah padi dan pilar utama industri peternakan nasional. Konsekuensinya, intensifikasi budidaya jagung menjadi keniscayaan untuk memenuhi permintaan yang meningkat. Strategi utama mendongkrak hasil panen secara global selama ini bertumpu pada penggunaan pupuk anorganik (kimia) yang mengandung unsur hara makro esensial (N, P, K). Pupuk NPK terbukti mampu memberikan respons pertumbuhan cepat dan peningkatan hasil signifikan. Namun, ketergantungan berlebihan dan penggunaan masif jangka panjang telah menimbulkan serangkaian masalah kompleks, meliputi penurunan efisiensi ekonomi, ancaman keberlanjutan agronomi, dan isu kelestarian lingkungan (Govindasamy *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023).

Masalah mendasar dalam pertanian modern adalah rendahnya efisiensi penggunaan hara. Fakta menunjukkan bahwa seringkali kurang dari 50% nitrogen dari pupuk anorganik dapat diserap efektif oleh tanaman (Govindasamy *et al.*, 2023; Toda *et al.*, 2023). Sisa nitrogen yang tidak terserap hilang melalui berbagai jalur, memicu kerugian ekonomi dan degradasi lingkungan serius. Nitrogen hilang ke atmosfer melalui volatilisasi amonia (NH_3) dan denitrifikasi, yang menghasilkan dinitrogen oksida (N_2O), gas rumah kaca yang potensinya jauh lebih kuat daripada karbon dioksida (Belyaeva *et al.*, 2024; Govindasamy *et al.*, 2023). Selain itu, nitrogen dalam bentuk nitrat (NO_3^-) mudah larut dan dapat tercuci (*leaching*) dari zona perakaran, mencemari sumber air tanah dan menyebabkan eutrofikasi (Belyaeva *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2023). Kehilangan nitrogen ini tidak hanya merepresentasikan kerugian ekonomi yang signifikan bagi petani, tetapi juga memicu degradasi lingkungan yang serius, mengancam kualitas air, kesehatan tanah, dan keseimbangan ekosistem (Zhu *et al.*, 2023). Fosfor mengalami fiksasi oleh Al dan Fe pada tanah masam sehingga ketersediaannya menjadi rendah (Johan *et al.*, 2021). Kalium dapat tercuci pada tanah bertekstur kasar atau terjerap oleh mineral tertentu sehingga tidak tersedia bagi tanaman (Nigon & Kaiser, 2025). Kondisi tersebut menyebabkan efisiensi penggunaan hara menjadi rendah dan berdampak pada peningkatan biaya produksi serta penurunan kualitas lingkungan. Penggunaan pupuk anorganik berlebihan juga dapat menurunkan kandungan karbon organik tanah (soil organic carbon/SOC), yang vital bagi kesuburan tanah (Uddin *et al.*, 2023).

Fenomena NUE rendah ini adalah masalah global yang menuntut perubahan manajemen pemupukan (Govindasamy *et al.*, 2023; Hegedus *et al.*, 2023).

Menghadapi tantangan meningkatkan produksi pangan sekaligus memitigasi dampak negatif pertanian, paradigma pengelolaan hara bergeser dari ketergantungan input kimia menuju pendekatan yang terintegrasi dan berkelanjutan. Strategi menjanjikan adalah mengkombinasikan pupuk anorganik dengan pupuk organik, seperti pupuk kandang. Pendekatan ini menciptakan sinergi positif di dalam tanah, bukan hanya mengurangi dosis kimia. Pupuk kandang kambing menawarkan manfaat melampaui penyediaan hara. Penambahan bahan organik berfungsi sebagai amelioran yang memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Secara fisik, bahan organik meningkatkan agregasi tanah, memperbaiki aerasi, dan kapasitas menahan air (Wang *et al.*, 2023). Secara kimia, bahan organik meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan menstabilkan pH tanah (Xie *et al.*, 2023). Secara biologis, bahan organik adalah sumber energi utama bagi mikroorganisme bermanfaat, berkorelasi positif dengan kesehatan tanah (Toda *et al.*, 2023). Kesehatan tanah yang optimal ini menjadi kunci untuk meningkatkan efisiensi pupuk anorganik, memungkinkan dosis pupuk kimia dikurangi tanpa mengorbankan hasil panen (Toda *et al.*, 2023).

Keberhasilan strategi pemupukan kombinasi sangat bergantung pada penentuan rasio proporsi yang tepat. Praktik ini memerlukan penyesuaian cermat berdasarkan jenis tanaman, kondisi tanah, dan iklim. Studi menunjukkan adanya respons non-linear terhadap tingkat substitusi pupuk organik. Penelitian jagung di wilayah semi-kering menemukan bahwa substitusi 30% N kimia dengan organik adalah tingkat optimal, sementara substitusi lebih tinggi justru menurunkan hasil (Wang *et al.*, 2024). Analisis jangka panjang di China juga mengidentifikasi efisiensi nitrogen tertinggi dicapai ketika 25% hingga 30% dari total input N berasal dari sumber organik (Zhu *et al.*, 2023). Variasi rekomendasi ini menegaskan bahwa interaksi antara jenis pupuk, dosis, dan lingkungan sangatlah kompleks (Schmidt *et al.*, 2025), sehingga diperlukan penelitian spesifik lokasi.

Penelitian ini difokuskan pada budidaya jagung di tanah ultisol, jenis tanah dominan di wilayah tropis basah seperti Indonesia yang memiliki tantangan kesuburan rendah, bahan organik minim, dan reaksi tanah masam (pH rendah). Kondisi pH masam menjadi faktor pembatas utama yang menyebabkan keracunan Aluminium (Al) dan Mangan (Mn), serta menghambat ketersediaan hara makro esensial. Studi menunjukkan bahwa pada tanah masam, penggunaan pupuk kandang mampu meningkatkan pH tanah, yang selanjutnya meningkatkan hasil dan NUE secara keseluruhan (Xie *et al.*, 2023). Dalam penelitian ini, Varietas jagung Pioneer 32 dipilih karena memiliki potensi hasil tinggi, responsif terhadap input pemupukan dan amelioran, serta telah banyak dibudidayakan di Kalimantan Barat. Kombinasi pupuk kandang kambing dan pupuk NPK

berpotensi menjadi solusi ideal untuk mengatasi masalah ganda dengan menyediakan hara seimbang sekaligus memperbaiki kemasaman tanah ultisol.

Urgensi penelitian ini muncul dari kebutuhan global untuk mitigasi dampak lingkungan melalui pengurangan penggunaan nitrogen mineral (Schmidt *et al.*, 2025), serta kebutuhan lokal Indonesia untuk meningkatkan produksi jagung di lahan sub-optimal. Meskipun kombinasi organik-anorganik telah terbukti bermanfaat, informasi spesifik mengenai dosis optimal kombinasi pupuk kandang kambing dan NPK untuk jagung Pioneer 32 di tanah ultisol masih sangat terbatas. Secara ilmiah, penelitian ini mengisi kesenjangan pengetahuan mengenai sinergi hara pada tanah masam. Secara praktis, penelitian ini bertujuan untuk (a) Mempelajari pengaruh pemberian kombinasi pupuk kandang kambing dan pupuk anorganik NPK terhadap hasil tanaman jagung dan efisiensi penggunaan hara dari pupuk anorganik di tanah ultisol, serta (b) Mendapatkan informasi mengenai dosis kombinasi pupuk kandang kambing dan pupuk anorganik NPK yang terbaik untuk budidaya jagung di tanah ultisol.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini dilakukan dengan melalui beberapa tahap berdasarkan Gambar 1. Diagram alir penelitian. Berikut penjelasan lebih lanjut dari tahapan penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

2.1. Bahan Penelitian

Pupuk kandang kambing yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari peternak lokal dalam kondisi telah terdekomposisi, dengan karakteristik kimia sebagai berikut: pH 6,71, C-organik 22,06%, N total 1,78%, C/N rasio 12,39. Kandungan fosfor, kalium, kalsium dan magnesium berturut-turut 1,43; 1,09; 1,24 dan 0,73%. Pupuk anorganik yang digunakan terdiri atas Urea (46% N), SP-36 (36% P₂O₅) dan KCl (50% K₂O). Tanah yang digunakan adalah tanah ultisol yang berasal dari daerah Ambawang, dengan bobot 10 kg per polybag berukuran 40 × 50 cm. Karakteristik kimia tanah ultisol sebagai berikut: pH 5,21, C-organik 1,52%, N total 0,21%, Ca-dd, Mg-dd, K-dd, Na-dd dan KTK berturut turut 1,03; 0,33; 0,09; 0,22 dan 5,67 cmol(+) kg^{-1} .

.Kejenuhan basa 29,45 %, pasir, debu dan liat berturut turut 51,22; 28,29 dan 20,49 %. Tanaman uji yang digunakan adalah jagung varietas Pioneer 32.

Pengambilan sampel tanah dilakukan pada kedalaman 0–30 cm menggunakan bor tanah (*auger*). Selanjutnya, sampel tanah dicampurkan hingga homogen untuk memperoleh sampel komposit. Sampel tanah kemudian dikeringanginkan, dihancurkan, dan diayak menggunakan saringan 2 mm untuk keperluan analisis laboratorium dan percobaan. Untuk analisis karbon organik dan nitrogen total, sampel tanah dihaluskan kembali hingga lolos saringan 0,5 mm.

2.2. Perlakuan dan Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktor tunggal yang terdiri dari lima taraf perlakuan dan setiap taraf diulang sebanyak lima kali, sehingga diperoleh 25 satuan percobaan. Adapun taraf perlakuan yang diberikan adalah sebagai berikut:

P0 : Tanpa pupuk kandang kambing dan tanpa pupuk anorganik

P1 : 100% pupuk anorganik

P2 : 50% pupuk anorganik

P3 : 100% pupuk anorganik + 100% pupuk kandang kambing

P4 : 50% pupuk anorganik + 100% pupuk kandang kambing

Kebutuhan pupuk kandang kambing pada lahan penelitian ditetapkan sebesar 60 ton ha⁻¹. Pupuk anorganik 100% yang digunakan yaitu Urea (46% N) sebanyak 500 kg ha⁻¹, SP-36 (36%P₂O₅) sebanyak 400 kg ha⁻¹, dan KCl (50% K₂O) sebanyak 300 kg ha⁻¹. Dosis pupuk per perlakuan dikonversi berdasarkan populasi tanaman jagung di lapangan yakni 50.000 tanaman ha⁻¹.

2.3. Tahapan Penelitian

Tanah ultisol yang telah dikeringkan dan dihaluskan selanjutnya dicampurkan dengan pupuk kandang sesuai perlakuan, kemudian dimasukkan ke dalam polybag. Selanjutnya, polybag diberi label dan disusun di lapangan menggunakan rancangan acak lengkap dengan lima ulangan, lalu diinkubasi selama dua minggu sebelum penanaman, dengan mempertimbangkan sifatnya yang melepaskan hara secara lambat.

Setelah inkubasi, tiga benih jagung ditanam pada setiap polybag bersamaan dengan aplikasi pupuk anorganik sesuai perlakuan. Pada 7 hari setelah tanam (HST), dilakukan penjarangan hingga tersisa satu tanaman terbaik per polybag. Pemeliharaan tanaman berupa penyiraman, penyiangan, dan pengendalian gulma dilakukan sesuai kebutuhan.

2.4. Pengambilan dan Analisis Jaringan Tanaman

Pada saat fase pembungaan jantan (*tasselling*), daun jagung telah tumbuh sempurna dan dewasa diambil secara acak dari ruas tengah setiap tanaman, kemudian dimasukkan ke dalam

kantong kertas. Daun segera dibilas dengan air suling di laboratorium untuk menghilangkan kotoran. Selanjutnya daun kembali dimasukkan ke dalam kantong kertas dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60–70 °C hingga mencapai bobot konstan. Daun kering kemudian digiling hingga lolos ayakan berukuran 2 mm dan disimpan dalam kantong plastik. Selanjutnya, konsentrasi N total dalam jaringan daun ditentukan dengan prosedur destruksi basah menggunakan metode Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982). Kandungan P total dan K total pada daun diekstraksi melalui destruksi basah dengan menggunakan asam sulfat pekat (H₂SO₄) dan asam nitrat (HNO₃), kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer (Sertsu & Bekele, 2000).

2.5. Analisis Tanah dan Pupuk Kandang

Setelah pengambilan sampel daun jagung, sampel tanah juga dikumpulkan, dikeringanginkan, digiling, dan disaring menggunakan ayakan berdiameter 2 mm untuk menentukan pengaruh perlakuan terhadap sifat kimia tanah terpilih. Reaksi tanah (pH) diukur secara potensiometrik dalam suspensi tanah:air (1:2,5) (van Reeuwijk, 2002). Kandungan karbon organik tanah ditentukan dengan prosedur oksidasi basah metode Walkley dan Black (FAO, 2019). Kandungan nitrogen total tanah ditetapkan dengan prosedur digesti basah metode Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982). Fosfor tersedia diekstraksi dengan metode Bray I (Olsen & Sommers, 1982) menggunakan larutan 0,03 M NH₄F dan 0,1 M HCl, kemudian diukur secara kolorimetrik dengan spektrofotometri. Kation dapat ditukar (Ca, Mg, K, dan Na) serta kapasitas tukar kation (KTK) ditentukan melalui ekstraksi dengan 1 M amonium asetat pada pH 7 (van Reeuwijk, 2002).

Pupuk kandang kambing yang telah dikomposkan selama tiga bulan dikeringanginkan, digiling, dan diayak dengan ayakan 2 mm. Reaksi tanah (pH) ditentukan dari suspensi pupuk kandang:air (1:10) sesuai referensi (Ndegwa & Thompson, 2001). Kandungan karbon organik ditetapkan dengan metode oksidasi basah dan titrasi cepat (FAO, 2019). Kandungan N total pupuk kandang ditentukan melalui prosedur digesti basah metode Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982). Fosfor total, Ca, Mg, K, dan Na diekstraksi dengan digesti basah menggunakan campuran asam sulfat pekat (H₂SO₄), bubuk selenium (Se), litium sulfat (Li₂SO₄), dan hidrogen peroksida (H₂O₂) (Okalebo *et al.*, 2002). Kandungan Ca dan Mg total ditentukan dari sampel hasil digesti basah menggunakan Spektroskopi Serapan Atom (AAS), sedangkan K ditetapkan dengan fotometer nyala. Fosfor total diukur dengan spektrofotometer (Okalebo *et al.*, 2002).

2.6. Parameter Penelitian

Parameter pertumbuhan tanaman meliputi biomassa bagian atas dan akar tanaman. Setelah itu, biomassa bagian atas dan akar tanaman dipanen, dikeringkan pada suhu 60–70 °C hingga bobot konstan, kemudian dihitung serapan hara menggunakan persamaan (1) (Phares *et al.*, 2022),

Efisiensi penggunaan hara menggunakan persamaan (2) (Phares *et al.*, 2022) dan efisiensi agronomi menggunakan persamaan (3) (Phares *et al.*, 2022).

$$\text{Serapan Hara (g polybag}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Kadar Hara (\%)} \times \text{Berat Kering (g polybag}^{-1}\text{)}}{100} \quad (1)$$

$$\text{Efisiensi Penggunaan Hara (NUE)(\%)} = \frac{\text{Serapan Hara (g polybag}^{-1}\text{)}}{\text{Jumlah Hara yang Diaplikasikan}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Efisiensi Agronomi} = \frac{\text{Kg hasil pada perlakuan} - \text{Kg hasil tanpa perlakuan}}{\text{Kg hara yang ditambahkan}} \quad (3)$$

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi variabel tanaman dan sifat kimia tanah. Variabel tanaman yang diukur adalah berat pipil kering per tanaman pada kadar air 14%, sedangkan parameter kimia tanah mencakup pH, C-organik, N-total, P-tersedia, dan KTK tanah.

2.7. Analisis Statistik

Data dianalisis menggunakan perangkat lunak R versi 4.0.5 dengan analisis varians (ANOVA) satu faktor. Uji lanjut dilakukan dengan BNJ (Beda Nyata Jujur) pada taraf signifikansi $p \leq 0,05$ untuk membandingkan rata-rata perlakuan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Serapan Hara dan Efisiensi Penggunaan Hara N, P dan K

Hasil analisis statistik pada [Tabel 1](#) menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi pupuk kandang kambing dan pupuk anorganik memberikan pengaruh yang sangat nyata ($P \leq 0,05$) terhadap serapan N, efisiensi serapan N, dan efisiensi penggunaan N oleh tanaman jagung. Pada parameter serapan N, perlakuan P4 (NPK 50% + 100% pukan kambing) menunjukkan nilai tertinggi secara signifikan, yaitu sebesar 107,64 kg N ha⁻¹, jauh melampaui perlakuan lainnya. Tingginya serapan N pada perlakuan P4 ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara pupuk organik dan anorganik. Pupuk kandang kambing tidak hanya menyumbang unsur hara, tetapi yang lebih penting adalah perannya sebagai pembenah tanah yang memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Kondisi tanah yang lebih baik ini menciptakan lingkungan perakaran yang optimal, sehingga akar tanaman mampu menyerap unsur hara secara lebih efektif. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa praktik manajemen organik dan peningkatan kesehatan tanah secara langsung akan mendorong efisiensi penggunaan nutrisi secara signifikan (Toda *et al.*, 2023).

Keterkaitan ini terlihat pada parameter efisiensi serapan N dan efisiensi penggunaan N. Perlakuan P4 dan P3, yang keduanya mengandung pupuk kandang kambing, menunjukkan efisiensi serapan N tertinggi. Puncak dari keunggulan perlakuan kombinasi terlihat pada efisiensi penggunaan N, di mana perlakuan P4 menghasilkan nilai tertinggi sebesar 11,21 kg biji per kg N. Temuan ini memiliki implikasi praktis yang sangat penting dengan mengurangi dosis pupuk

anorganik hingga 50% dan mengombinasikannya dengan pupuk kandang, efisiensi konversi N menjadi hasil panen menjadi jauh lebih optimal. Hasil ini mendukung penelitian sebelumnya pada tanaman jagung yang menunjukkan bahwa substitusi sebagian pupuk N kimia dengan pupuk organik mampu mempertahankan hasil panen sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen (Wang *et al.*, 2024). Dengan demikian, strategi pemupukan berimbang tidak hanya mampu meningkatkan produktivitas, tetapi juga secara signifikan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, yang pada akhirnya dapat mengurangi biaya input bagi petani dan meminimalkan dampak negatif lingkungan.

Tabel 1. Pengaruh Pupuk Kandang Kambing dan Pupuk Anorganik Terhadap Serapan N, Efisiensi Serapan N dan Efisiensi Penggunaan N.

Perlakuan	Serapan N (kg N ha ⁻¹)	Efisiensi serapan N (kg serapan N kg ⁻¹ N yang diaplikasikan)	Efisiensi penggunaan N (kg biji kg ⁻¹ N yang diaplikasikan)
P0 (tanpa perlakuan)	0,88c	0,18b	-
P1 (NPK 100%)	48,08b	0,21b	5,16b
P2 (NPK 50%)	38,48b	0,32ab	0,30c
P3 (NPK 100% + pukan kambing 100%)	45,24b	0,37a	6,71b
P4 (NPK 50% + pukan kambing 100%)	107,64a	0,46a	11,21a
P value	≤0,05	≤0,05	≤0,05
BNJ 0,05	21,81	0,12	2,56

Keterangan: Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata diantara perlakuan berdasarkan uji BNJ pada taraf 0,05.

Serupa dengan hasil pada unsur Nitrogen, data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa perlakuan pemupukan memberikan pengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap serapan P, efisiensi serapan P, dan efisiensi penggunaan P. Keunggulan signifikan dari kedua perlakuan yang mengandung pupuk kandang (P3 dan P4) menegaskan peran krusial bahan organik dalam meningkatkan ketersediaan Fosfor, terutama pada tanah ultisol. Tanah ultisol dikenal memiliki pH masam serta kandungan Al dan Fe tinggi yang menyebabkan unsur P dari pupuk anorganik mudah terikat (terfiksasi). Bahan organik dari pupuk kandang melepaskan asam-asam organik yang dapat membentuk senyawa kelat dengan Al dan Fe, sehingga mengurangi fiksasi P dan menjaga P tetap tersedia bagi tanaman. Temuan ini sangat relevan dengan kondisi tanah ultisol yang masam, di mana penggunaan pupuk kandang terbukti menjadi strategi yang paling unggul untuk meningkatkan hasil dan efisiensi hara (Xie *et al.*, 2023).

Menariknya, meskipun P3 menunjukkan serapan P total tertinggi, perlakuan P4 (NPK 50% + 100% pukan kambing) justru menunjukkan efisiensi serapan P tertinggi secara signifikan. Puncak keunggulan ini terlihat pada efisiensi penggunaan P, di mana perlakuan P4 dan P3 menunjukkan nilai tertinggi. Artinya, setiap kilogram P yang diberikan pada perlakuan kombinasi mampu dikonversi menjadi hasil biji yang jauh lebih tinggi dibandingkan perlakuan pupuk anorganik saja (P1). Praktik ini sejalan dengan konsep penggunaan pupuk organo-mineral yang

terbukti tidak hanya meningkatkan hasil dan efisiensi penggunaan hara, tetapi juga memperbaiki kualitas tanah dengan meningkatkan kandungan karbon organik (Uddin *et al.*, 2023). Secara keseluruhan, data ini membuktikan bahwa strategi yang paling efisien untuk Fosfor di tanah ultisol adalah kombinasi pupuk kandang dengan dosis pupuk anorganik yang dikurangi, yang mampu mengatasi masalah fiksasi P sekaligus meningkatkan produktivitas.

Tabel 2. Pengaruh Pupuk Kandang Kambing dan Pupuk Anorganik Terhadap Serapan P, Efisiensi Serapan P dan Efisiensi Penggunaan P.

Perlakuan	Serapan P (kg P ha ⁻¹)	Efisiensi serapan P (kg serapan P kg ⁻¹ P yang diaplikasikan)	Efisiensi penggunaan P (kg biji kg ⁻¹ P yang diaplikasikan)
P0 (tanpa perlakuan)	2,39d	0,10c	-
P1 (NPK 100%)	7,73c	0,05e	8,26b
P2 (NPK 50%)	7,02c	0,07d	0,96c
P3 (NPK 100% + pukan kambing 100%)	22,75a	0,13b	17,91a
P4 (NPK 50% + pukan kambing 100%)	17,42b	0,18a	21,42a
P value	≤0,05	≤0,05	≤0,05
BNJ 0,05	1,41	0,01	4,61

Keterangan: Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata diantara perlakuan berdasarkan uji BNJ pada taraf 0,05.

Tabel 3. Pengaruh Pupuk Kandang Kambing dan Pupuk Anorganik Terhadap Serapan K, Efisiensi Serapan K dan Efisiensi Penggunaan K.

Perlakuan	Serapan K (kg K ha ⁻¹)	Efisiensi serapan K (kg serapan K kg ⁻¹ K yang diaplikasikan)	Efisiensi penggunaan K (kg biji kg ⁻¹ K yang diaplikasikan)
P0 (tanpa perlakuan)	1,69d	0,02c	-
P1 (NPK 100%)	27,11c	0,11bc	7,92b
P2 (NPK 50%)	31,29c	0,19b	0,92c
P3 (NPK 100% + pukan kambing 100%)	95,91a	0,41a	17,19a
P4 (NPK 50% + pukan kambing 100%)	58,84b	0,37a	20,57a
P value	≤0,05	≤0,05	≤0,05
BNJ 0,05	18,11	0,10	4,43

Keterangan: Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata diantara perlakuan berdasarkan uji BNJ pada taraf 0,05.

Data pada Tabel 3 secara konsisten menunjukkan bahwa perlakuan memberikan pengaruh yang nyata ($P=0,05$) terhadap seluruh parameter yang berkaitan dengan unsur Kalium (K). Serapan K tertinggi dicapai oleh perlakuan P3, yang kembali menunjukkan bahwa input hara total yang tinggi didukung oleh kondisi tanah yang baik akan menghasilkan serapan maksimal. Namun, yang lebih penting adalah peran pupuk kandang dalam mencegah kehilangan Kalium. Unsur K yang berbentuk kation (K^+) sangat rentan tercuci pada tanah ultisol yang memiliki Kapasitas Tukar Kation (KTK) rendah. Penambahan pupuk kandang secara signifikan meningkatkan KTK tanah, menyediakan situs negatif untuk menahan K^+ . Kemampuan bahan organik untuk memperbaiki sifat fisik tanah, termasuk kapasitas menahan air dan hara, berperan penting dalam mengurangi

kehilangan akibat pencucian (Wang *et al.*, 2023). Dengan demikian, pupuk kandang berfungsi sebagai gudang penyimpanan Kalium yang membuatnya tetap tersedia bagi tanaman.

Pada parameter efisiensi serapan K dan efisiensi penggunaan K, temuan kunci adalah perlakuan P4 (NPK 50% + 100% pukan kambing) dan P3 (NPK 100% + 100% pukan kambing) menunjukkan efisiensi tertinggi dan secara statistik tidak berbeda nyata. Fakta bahwa P4 (dengan separuh dosis pupuk KCl) mampu mencapai tingkat efisiensi yang setara dengan P3 membuktikan bahwa peningkatan KTK oleh pupuk kandang sudah sangat efektif dalam menahan dan menyediakan Kalium. Hasil ini menegaskan kembali bahwa praktik manajemen yang berfokus pada peningkatan kesehatan tanah akan mendorong efisiensi penggunaan nutrisi secara signifikan (Toda *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pendekatan terpadu dengan mengurangi pupuk anorganik dan menambahkan pupuk kandang (seperti pada P4) merupakan solusi yang paling unggul untuk memaksimalkan manfaat pemupukan Kalium, baik dari segi agronomi maupun ekonomi, pada lahan ultisol.

Tabel 4. Pengaruh Pupuk Kandang Kambing dan Pupuk Anorganik Terhadap pH Tanah, KTK, C- organik, N-Total, P Tersedia dan K-dd Tanah.

Perlakuan	pH	KTK (Cmol(+) kg ⁻¹)	C- organik (%)	N total (%)	P tersedia (ppm)	K-dd (Cmol(+) kg ⁻¹)
P0 (tanpa perlakuan)	5,23c	6,09d	1,60b	0,12b	4,36b	1,29d
P1 (NPK 100%)	5,93b	6,47c	1,66b	0,16ab	4,42b	5,19c
P2 (NPK 50%)	5,79b	7,68b	1,79b	0,14ab	4,03b	5,56c
P3 (NPK 100% + pukan kambing 100%)	6,37a	8,29a	2,19ab	0,16ab	57,38a	9,78a
P4 (NPK 50% + pukan kambing 100%)	6,25a	8,16a	2,21ab	0,19ab	45,42a	7,61b
P value	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
BNJ 0,05	0,21	0,29	0,16	0,05	25,68	0,19

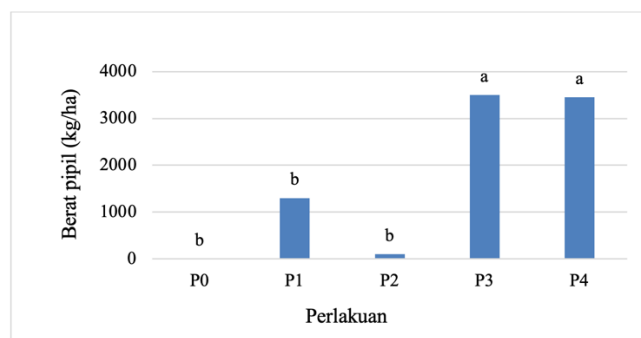
Keterangan: Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata diantara perlakuan berdasarkan uji BNJ pada taraf 0,05.

3.2. Sifat Kimia Tanah

Data pada Tabel 4 menyajikan bukti fundamental yang menjelaskan mekanisme di balik peningkatan serapan dan efisiensi hara yang diamati pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Hasil analisis menunjukkan bahwa perlakuan, khususnya yang melibatkan pupuk kandang kambing (P3 dan P4), memberikan pengaruh yang sangat nyata ($P < 0,05$) terhadap perbaikan sifat-sifat kimia tanah ultisol. Perbaikan fundamental pada kesehatan tanah ini merupakan kunci utama yang mendorong efisiensi penggunaan nutrisi, sebuah prinsip yang menegaskan bahwa praktik manajemen organik secara langsung akan meningkatkan efisiensi hara secara signifikan (Toda *et al.*, 2023). Secara spesifik, penambahan pupuk kandang berhasil meningkatkan pH tanah secara signifikan, dari kondisi sangat masam ke tingkat yang lebih ideal bagi tanaman. Hal ini sangat krusial dan sejalan dengan temuan bahwa pada tanah masam, penggunaan pupuk kandang

merupakan strategi unggul karena kemampuannya dalam memperbaiki pH (Xie *et al.*, 2023). Secara bersamaan, perlakuan ini juga menyebabkan peningkatan tertinggi pada kandungan C-organik, yang merupakan akibat langsung dari input bahan organik. Peningkatan ini mendukung penelitian lain yang membuktikan bahwa pupuk berbasis organik mampu memperbaiki kualitas tanah dengan meningkatkan kandungan karbon organik tanah (SOC) (Uddin *et al.*, 2023). Peningkatan C-organik inilah yang menjadi fondasi bagi perbaikan kapasitas tukar kation (KTK), yang pada gilirannya meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan kation hara.

Hubungan ini secara transparan menjelaskan hasil pada tabel-tabel sebelumnya. Peningkatan pada P tersedia pada (Tabel 4) dengan perlakuan P3 dan P4 adalah bukti bahwa bahan organik dan pH yang lebih tinggi berhasil mengatasi masalah fiksasi P, yang menjelaskan mengapa serapan P (Tabel 2) sangat tinggi. Demikian pula, peningkatan KTK dan K-dapat ditukar (Tabel 4) secara langsung menjelaskan mengapa serapan K (Tabel 3) meningkat drastis, karena tanah menjadi lebih mampu menahan ion K^+ dari kehilangan akibat pencucian. Secara keseluruhan, Tabel 4 menegaskan bahwa keunggulan strategi pemupukan terpadu bukan hanya karena penambahan hara semata, melainkan karena kemampuannya untuk memperbaiki kesehatan dan fungsi tanah secara fundamental, yang membuat penggunaan pupuk anorganik menjadi jauh lebih efisien dan berkelanjutan.



Gambar 2. Pengaruh Kombinasi Pupuk Kandang kambing dan Pupuk anorganik terhadap Berat pipil jagung.

3.3. Berat Pipil Jagung

Gambar 2 menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi pupuk kandang kambing dan pupuk anorganik memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap hasil panen jagung dalam bentuk berat pipil (kg/ha). Secara signifikan, perlakuan P4 (NPK 50% + 100% pupuk kandang kambing) dan perlakuan P3 (NPK 100% + 100% pupuk kandang kambing) mencapai hasil tertinggi dan secara statistik tidak berbeda nyata satu sama lain. Keunggulan perlakuan kombinasi ini jauh melampaui perlakuan pupuk anorganik NPK 100% saja dan kontrol. Hasil ini membuktikan bahwa strategi substitusi sebagian pupuk N kimia dengan pupuk organik mampu mempertahankan hasil panen sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen (Wang *et al.*, 2024). Dengan

demikian, strategi pemupukan berimbang tidak hanya mampu meningkatkan produktivitas, tetapi juga secara signifikan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk.

Tingginya hasil berat pipil pada perlakuan P4, meskipun hanya menggunakan separuh dosis pupuk NPK, merupakan konfirmasi nyata dari peningkatan efisiensi hara yang telah dibahas sebelumnya. Secara spesifik, perlakuan P4 menghasilkan efisiensi penggunaan N tertinggi sebesar 11,21 kg biji per kg N, yang menunjukkan bahwa efisiensi konversi N menjadi hasil panen menjadi jauh lebih optimal (Wang *et al.*, 2024). Demikian pula, puncak keunggulan juga terlihat pada efisiensi penggunaan P, di mana perlakuan P4 dan P3 menunjukkan nilai tertinggi, yang berarti setiap kilogram P yang diberikan mampu dikonversi menjadi hasil biji yang jauh lebih tinggi dibandingkan perlakuan pupuk anorganik saja (Uddin *et al.*, 2023). Hasil ini sejalan dengan konsep penggunaan pupuk organo-mineral (Uddin *et al.*, 2023).

Pencapaian hasil panen ini didasarkan pada perbaikan kesehatan tanah. Pupuk kandang kambing berperan sebagai pembenah tanah yang memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Toda *et al.*, 2023). Kondisi tanah yang lebih baik ini, ditunjukkan oleh peningkatan pH tanah dan kapasitas tukar kation (KTK) pada Tabel 4, menciptakan lingkungan perakaran yang optimal sehingga akar tanaman mampu menyerap unsur hara secara lebih efektif (Toda *et al.*, 2023). Perbaikan ini secara langsung mengatasi masalah fiksasi P pada tanah ultisol yang masam, di mana penggunaan pupuk kandang merupakan strategi unggul (Xie *et al.*, 2023), serta mencegah kehilangan K akibat pencucian karena peningkatan KTK (Wang *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pendekatan (seperti pada P4) merupakan solusi yang paling baik untuk memaksimalkan manfaat pemupukan (Toda *et al.*, 2023).

4. Kesimpulan

Pemberian kombinasi pupuk kandang kambing dan pupuk anorganik NPK memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap perbaikan sifat kimia tanah ultisol, yang ditandai dengan peningkatan signifikan pada pH tanah (mengatasi kemasaman), C-organik, dan kapasitas tukar kation (KTK). Perbaikan sifat tanah ini meningkatkan serapan hara dan efisiensi penggunaan hara oleh tanaman jagung. Perlakuan 50% NPK + 100% pupuk kandang kambing adalah yang paling efektif dan efisien secara statistik untuk serapan N dan efisiensi penggunaan N, P, serta K. Perlakuan kombinasi 50% NPK + 100% pupuk kandang kambing dan 100% NPK + 100% pupuk kandang kambing menghasilkan berat pipil tertinggi yang tidak berbeda nyata secara statistik (sekitar 3.400–3.500 kg/ha). Strategi substitusi 50% dosis pupuk NPK anorganik dengan menambahkan pupuk kandang kambing adalah dosis kombinasi yang terbaik karena mampu menghasilkan produktivitas tinggi setara dosis NPK penuh, namun dengan efisiensi penggunaan pupuk yang jauh lebih optimal, yang menguntungkan secara ekonomi dan lingkungan.

Singkatan yang Digunakan

NUE	Nutrient Use Efficiency
SOC	Soil Organic Carbon
KTK	Kapasitas Tukar Kation

Pernyataan Ketersediaan Data

Data akan tersedia berdasarkan permintaan

Kontribusi Para Penulis

Rita Hayati: melakukan perancangan penelitian, percobaan lapangan, dan analisis laboratorium, serta menyusun naskah. **Leony Augustine:** membantu analisis laboratorium dan analisis data statistik. **Feira Budiarsyah Arief:** melakukan supervisi penelitian dan memberikan masukan dalam pembahasan serta revisi naskah. Seluruh penulis menyetujui naskah akhir.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis naskah ini menyatakan tidak ada konflik kepentingan atau kepentingan yang bersaing.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Tanjungpura Pontianak yang telah mendanai kegiatan ini melalui dana DiPA Universitas Tanjungpura.

Daftar Pustaka

- Belyaeva, O., Ward, G., Wijesinghe, T., Chen, D., & Suter, H. (2024). Influence of soil organic matter, fertiliser formulation and season on fertiliser nitrogen use efficiency in temperate pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 129(1), 133–150. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10362-9>
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen—Total. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 595–624). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
- Esmailzadeh-Salestani, K., Tohidfar, M., Seraj, R. G. M., Khaleghdoust, B., Keres, I., Marawne, H., & Loit, E. (2023). Transcriptome profiling of barley in response to mineral and organic fertilizers. *BMC Plant Biology*, 23(1), 261. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04263-2>
- FAO. (2019). *Standard Operating Procedure for Soil Organic Carbon. Walkley-Black Method, Titration and Colorimetric Method*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ca7471en/ca7471en.pdf>
- Govindasamy, P., Muthusamy, S. K., Bagavathiannan, M., Mowrer, J., Jagannadham, P. T. K., Maity, A., ..., & Tiwari, G. (2023). Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121073>
- Hegedus, P. B., Ewing, S. A., Jones, C., & Maxwell, B. D. (2023). Using spatially variable nitrogen application and crop responses to evaluate crop nitrogen use efficiency. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 126(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10263-3>
- 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). <https://doi.org/10.3390/agronomy11102010>

- Ndegwa, P. M., & Thompson, S. A. (2001). Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids. *Bioresource Technology*, 76(2), 107–112. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00104-8)
- Nigon, L., & Kaiser, D. (2025). Factors affecting potassium retention in sandy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 89(4). <https://doi.org/10.1002/saj2.70094>
- Okalebo, J. R., Gathua, K. W., & Woomer, P. L. (2002). *Laboratory Methods of Soil and Plant Analysis: A Working Manual* (2nd Edition, Ed.). Sacred Africa Nairobi Office.
- Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 403–430). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
- Phares, C. A., Amoakwah, E., Danquah, A., Afrifa, A., Beyaw, L. R., & Frimpong, K. A. (2022). Biochar and NPK fertilizer co-applied with plant growth promoting bacteria (PGPB) enhanced maize grain yield and nutrient use efficiency of inorganic fertilizer. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100434. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100434>
- Schmidt, S., Krishnan, V., Gamage, H., Walsh, M., Huelsen, T., Wolf, J., Wadewitz, P., Jensen, P., Das, B., & Robinson, N. (2025). Enabling the circular nitrogen economy with organic and organo-mineral fertilisers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 130(1), 33–48. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10380-7>
- Sertsu, S., & Bekele, T. (2000). *Procedures for Soil and Plant Analysis*. National Soil Research Centre, Ethiopian Agricultural Research Organization.
- Toda, M., Walder, F., & van der Heijden, M. G. A. (2023). Organic management and soil health promote nutrient use efficiency. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 2(3), 215–224. <https://doi.org/10.1002/sae2.12058>
- Uddin, Md. K., Yeasmin, S., Mohiuddin, K. M., Chowdhury, Md. A. H., & Saha, B. K. (2023). Peat-Based Organo-Mineral Fertilizer Improves Nitrogen Use Efficiency, Soil Quality, and Yield of Baby Corn (*Zea mays* L.). *Sustainability*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/su15119086>
- van Reeuwijk, L. P. (2002). *Procedures for Soil Analysis* (6th Edition, Ed.). ISRIC, FAO.
- Wang, L., Zhou, H., & Fei, C. (2024). Substituting partial chemical nitrogen fertilizers with organic fertilizers maintains grain yield and increases nitrogen use efficiency in maize. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1442123>
- Wang, X., Tian, L., & Xu, L. (2023). Effects of Manure-Based Nitrogen Substitution for Chemical Nitrogen Fertilizers on Economic Benefits and Water-Use Efficiency of Maize. *Agronomy*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy13123031>
- Xie, J., Evgenia, B., Zhang, Y., Wang, J., Wan, Y., & Shi, X.-J. (2023). Fertilization strategies to improve crop yields and N use efficiency depending on soil pH. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(10), 1893–1905. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2126457>
- Zhu, X., Ros, G. H., Xu, M., Cai, Z., Sun, N., Duan, Y., & de Vries, W. (2023). Long-term impacts of mineral and organic fertilizer inputs on nitrogen use efficiency for different cropping systems and site conditions in Southern China. *European Journal of Agronomy*, 146, 126797. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126797>