



Pengaruh Imbangan Pupuk Makro dan Mikro terhadap Ketersediaan P dan Fe serta Hasil Tanaman Jagung (*Zea Mays* L.) di Tanah Inceptisol

Hery Widijanto*, Slamet Minardi, Jauhari Syamsiyah, Alvin Fauzan Al Haddad
Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

*Corresponding author: herywidijanto@staff.uns.ac.id

Received: January 27, 2026; Revised: May 5, 2026; Accepted: May 15, 2026

ABSTRAK

Ketidakseimbangan hara tanah akibat aplikasi intensif pupuk nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) dapat menurunkan efisiensi pemupukan dan mengganggu keseimbangan hara, khususnya unsur mikro yang berperan penting dalam proses fisiologis tanaman. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan integrasi pupuk mikro dalam strategi pemupukan berimbang guna meningkatkan ketersediaan hara dan mendukung produktivitas tanaman secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh keseimbangan pupuk makro dan mikro terhadap ketersediaan fosfor (P) dan besi (Fe), serta hasil tanaman jagung (*Zea mays* L.) pada tanah Inceptisol. Percobaan dilakukan menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) dengan sembilan perlakuan dan tiga ulangan, sehingga diperoleh 27 petak percobaan.. Perlakuan terdiri dari kombinasi dosis pupuk makro (NPK: Urea, SP-36, dan KCl) dan pupuk mikro (Fe, B, Zn, Cu, Mo) dengan dosis A: kontrol; B: NPK rekomendasi; C: $\frac{1}{4}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro; D: $\frac{1}{2}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro; E: $\frac{3}{4}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro; F: 1 NPK + 5 L/ha pupuk mikro; G: $\frac{3}{4}$ NPK + 1,25 L/ha pupuk mikro; H: $\frac{3}{4}$ NPK + 2,5 L/ha pupuk mikro; I: $\frac{3}{4}$ NPK + 3,75 L/ha pupuk mikro. Parameter yang diamati meliputi ketersediaan hara P dan Fe dalam tanah, komponen hasil jagung yang panjang, diameter, dan berat tongkol, serta berat pipilan. Data hasil pengamatan dianalisis menggunakan ANOVA dengan taraf kepercayaan 5%, dilanjutkan dengan uji *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) dan Uji Korelasi *Pearson*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan $\frac{3}{4}$ NPK yang dikombinasikan dengan pupuk mikro sebanyak 5 L ha⁻¹ merupakan perlakuan paling efektif. Perlakuan ini secara signifikan meningkatkan ketersediaan P dan Fe dalam tanah serta meningkatkan komponen hasil jagung, meliputi panjang tongkol, diameter tongkol, bobot tongkol, dan bobot 1.000 butir. Temuan ini menunjukkan bahwa pemupukan berimbang berperan penting dalam mengoptimalkan ketersediaan hara dan meningkatkan produktivitas tanaman pada tanah Inceptisol.

Kata kunci : kimia tanah; komponen hasil; manajemen hara; mikronutrien; strategi pemupukan

Effects of Macro and Micronutrient Fertilizer Balance on Phosphorus and Iron Availability and Maize (*Zea mays* L.) Yield in Inceptisol Soil

ABSTRACT

Soil nutrient imbalance caused by the intensive application of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) fertilizers can reduce fertilization efficiency and disrupt nutrient equilibrium, particularly micronutrients that play essential roles in plant physiological processes. To overcome this issue, the integration of micronutrient fertilizers into a balanced fertilization strategy is required to improve nutrient availability and sustain crop productivity. This study aimed to evaluate the effects of macro- and micronutrient fertilizer balance on phosphorus (P) and iron (Fe) availability, as well as maize (*Zea mays* L.) yield in Inceptisol soil. The experiment was conducted using a Randomized Complete Block Design (RCBD) with nine treatments and three replications, resulting in 27 experimental plots. The treatments consisted of combinations of macronutrient fertilizers (NPK: urea, SP-36, and KCl) and micronutrient fertilizers (Fe, B, Zn, Cu, and Mo), namely: A (control); B (recommended NPK); C ($\frac{1}{4}$ NPK + 5 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer); D ($\frac{1}{2}$ NPK + 5 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer); E ($\frac{3}{4}$ NPK + 5 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer); F (1 NPK + 5 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer); G ($\frac{3}{4}$ NPK + 1.25 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer); H ($\frac{3}{4}$ NPK + 2.5 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer); and I ($\frac{3}{4}$ NPK + 3.75 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer). Observed parameters included soil P and Fe availability, maize yield components such as ear length, ear diameter, ear weight, and grain weight, as well as 1,000-grain weight. The collected data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) at a 5% significance level, followed by *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) and *Pearson correlation analysis*. The results showed that the application of $\frac{3}{4}$ NPK combined with 5 L ha⁻¹ micronutrient fertilizer was the most effective treatment. This treatment significantly increased soil P and Fe availability and improved maize yield components, including ear length, ear

diameter, ear weight, and 1,000-grain weight. These findings indicate that balanced fertilization is essential for optimizing nutrient availability and enhancing crop productivity in Inceptisol soils.

Keywords: bioactive compound; liquid biofertilizer; red chili; spice; yield

Cite this as: Widijanto, H., Minardi, S., Syamsyah, J., & Haddad, A.F.A. (2026). Effects of Macro and Micronutrient Fertilizer Balance on Phosphorus and Iron Availability and Maize (*Zea mays L.*) Yield in Inceptisol Soil. *Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi*, 28(1), 20-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.20961/agsjpa.v28i1.115223>

PENDAHULUAN

Jagung (*Zea mays L.*) merupakan komoditas pangan strategis yang berperan sebagai sumber karbohidrat serta bahan baku utama industri pangan, pakan ternak, dan bioenergi (Fiqriansyah *et al.*, 2021). Produksi jagung nasional yang relatif tinggi, sebagaimana dilaporkan oleh Badan Pusat Statistik, (2024), tercatat sebesar 14,46 juta ton pipilan kering, sementara kebutuhan jagung nasional mencapai 17,7 juta ton. Kondisi ini menunjukkan bahwa produksi jagung dalam negeri belum sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhan nasional, sehingga diperlukan upaya peningkatan produktivitas dan efisiensi budidaya untuk mendukung pemenuhan kebutuhan jagung secara berkelanjutan.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menekan penurunan produktivitas adalah dengan mengoptimalkan pemanfaatan lahan marginal di Indonesia, yang luasnya mencapai 157 juta hektar namun baru sekitar 58,4% yang dapat dimanfaatkan untuk pertanian produktif (Masinambow *et al.*, 2021). Salah satunya adalah tanah inceptisol yang memiliki tingkat kematangan tanah rendah, pH masam, serta ketersediaan unsur hara makro yang terbatas (Basuki & Sari, 2019). Produktivitas jagung pada tanah Inceptisol umumnya masih rendah, berkisar antara 2,5–4,5 ton/ha, dan berada jauh di bawah potensi hasil jagung pada tanah yang lebih subur seperti Vertisol yang dapat menghasilkan lebih dari 8 ton ha⁻¹ (Odugbenro *et al.*, 2023). Kondisi tersebut menyebabkan pertumbuhan dan hasil tanaman jagung belum optimal.

Peningkatan produktivitas lahan Inceptisols dapat dilakukan melalui manajemen pemupukan yang tepat. Pemupukan di tingkat petani masih didominasi oleh penggunaan pupuk makro, khususnya N, P, dan K, tanpa diimbangi unsur hara mikro. Ketidakeimbangan pemupukan tersebut menurunkan efisiensi serapan hara. Pemberian nitrogen berlebih menghambat serapan fosfor (P) dan unsur mikro lainnya (Murnita & Taher, 2021), sementara kelarutan besi (Fe) yang tinggi pada Inceptisol memperkuat antagonisme terhadap fosfor (P) sehingga menurunkan fotosintesis dan hasil jagung (Hartono *et al.*, 2022). Penambahan pupuk mikro diperlukan untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Unsur mikro seperti Fe, Zn, B, Cu, dan Mo berperan sebagai kofaktor enzim dan mendukung metabolisme tanaman. Hasil penelitian Khastini *et al.*, (2024) menunjukkan bahwa pemberian unsur mikro dapat meningkatkan aktivitas enzim fosfatase yang dihasilkan oleh mikroorganisme tanah dan akar tanaman, yang berperan dalam menghidrolisis senyawa fosfat sehingga melepaskan fosfat dari ikatan dengan Fe, Al, dan Ca, sehingga meningkatkan ketersediaan P di dalam tanah. Pemberian unsur mikro secara berlebihan juga dapat memicu antagonisme antar unsur hara, sehingga pemupukan yang tidak berimbang berpotensi

menciptakan kendala baru (Hakim & Hermansah, 2025). Pemupukan berimbang antara pupuk makro dan mikro diperlukan untuk meningkatkan ketersediaan hara tanah dan efisiensi serapan nutrisi tanaman, sekaligus membuka peluang substitusi sebagian pupuk NPK sehingga penggunaan pupuk kimia menjadi lebih efisien.

Pemupukan berimbang antara pupuk makro dan mikro telah dilaporkan mampu meningkatkan ketersediaan hara tanah dan efisiensi serapan nutrisi tanaman. Penelitian Fauziah *et al.*, (2018) menunjukkan bahwa pemberian pupuk mikro dengan dosis 300 g ha⁻¹ mampu meningkatkan hasil produksi tanaman teh sebesar 36,56 kg/petak. Pada penelitian Amelia *et al.*, (2017) yang dilaksanakan pada lahan pertanian mineral menunjukkan bahwa kombinasi pupuk hara mikro cair (1, 1½, dan 2) dengan 1 N,P,K memberikan hasil pipilan biji yang sama tinggi pada *Fluentic Eutrudepts* Jatiningor yang masing-masing sebesar 19,93; 18,57; dan 18,17 kg/petak atau setara dengan 8,47; 7,89; dan 7,72 ton ha⁻¹. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji keterkaitan antara ketersediaan P dan Fe tanah serta respons hasil jagung secara simultan, dan belum dilakukan secara spesifik pada tanah Inceptisol yang memiliki karakteristik kimia khas, terutama terkait ketersediaan P dan Fe.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di Dusun Dadapan, Desa Jatikuwung, Kecamatan Gondangrejo, Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah (7°30'58.93" LS; 110°50'34.16" BT) serta Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Sebelas Maret dari Desember 2023 hingga Juli 2024. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) sebanyak sembilan perlakuan dengan 3 kali ulangan (Tabel 1).

Pupuk hara makro yang digunakan meliputi Urea dengan kandungan N (46%), Sp-36 dengan kandungan P₂O₅ (36%), serta KCl dengan kandungan K₂O (60%). Sedangkan Pupuk hara mikro yang digunakan merupakan pupuk cair majemuk yang mengandung unsur B (0,84%), Fe (0,93%), Zn (0,66%), Mn (0,96%), dan Cu (0,98%).

Benih jagung hibrida varietas Bisi-2 ditanam pada petak berukuran 4 m × 5 m dengan jarak tanam 75 cm × 25 cm (Syamsiyah *et al.*, 2023), Aplikasi pupuk KCl, SP-36, dan pupuk mikro dilakukan pada saat tanam (0 HST), sedangkan pupuk Urea diaplikasikan sebanyak 3 kali yaitu 0 HST sebanyak 40%, 14 HST sebanyak 30%, dan 28 HST sebanyak 30% (Tustiyani *et al.*, 2025). Untuk menjamin pemerataan aplikasi, pupuk makro ditimbang sesuai dosis pada masing-masing perlakuan sebelum diaplikasikan. Pupuk kemudian diaplikasikan secara merata dengan cara ditabur sepanjang barisan tanaman

pada jarak yang seragam dari pangkal batang. Setiap dosis diberikan pada titik aplikasi yang konsisten antar tanaman dalam satu petak percobaan untuk meminimalkan variasi distribusi pupuk. Pupuk mikro diaplikasikan melalui penyemprotan daun menggunakan *sprayer* bertekanan konstan, dengan volume larutan

yang sama pada setiap petak percobaan, sehingga distribusi pupuk mikro antar tanaman dan antar petak berlangsung seragam. Perawatan tanaman meliputi penyiraman, penyiangan, penjarangan, pembubunan, serta pengendalian hama dan penyakit tanaman (Purwanto *et al.*, 2021).

Tabel 1. Rancangan Percobaan Perlakuan

Kode	Perlakuan	Takaran Pupuk NPK		
		kg/ha		
		Urea	SP-36	KCI
A	Kontrol	0,0	0	0,00
B	NPK Rekomendasi	350,0	200	75,00
C	¼ NPK + 5 L/ha Pupuk Mikro	87,5	50	18,75
D	½ NPK + 5 L/ha Pupuk Mikro	175,0	100	37,50
E	¾ NPK + 5 L/ha Pupuk Mikro	262,5	150	56,25
F	1 NPK + 5 L/ha Pupuk Mikro	350,0	200	75,00
G	¾ NPK + 1,25 L/ha Pupuk Mikro	262,5	150	56,25
H	¾ NPK + 2,5 L/ha Pupuk Mikro	262,5	150	56,25
I	¾ NPK + 3,75 L/ha Pupuk Mikro	262,5	150	56,25

Sumber: Data Primer

Sampel tanah dan tanaman diambil pada puncak masa vegetatif tanaman jagung atau pada 56 HST. Sampel tanah diambil pada daerah perakaran tanaman yang diamati dengan pemberian tanda patok untuk memastikan konsistensi lokasi pengambilan sampel pada setiap unit percobaan serta meminimalkan variasi spasial (Puspaningrum & Djabar, 2018). Setelah itu dikeringkan dan ditumbuk untuk analisis pH tanah dengan ukuran 0,5 mm menggunakan metode potensiometri, P-tersedia (metode *Bray I*), dan Fe-tersedia (metode ekstraksi DTPA, yaitu *Diethylenetriaminepentaacetic Acid*) (BSIP, 2023). Sampel tanaman yang diambil adalah daun tanaman jagung nomer 5 dari pucuk, digunakan untuk analisis kadar P-jaringan (metode destruksi dengan HNO₃ dan HClO₄).

Parameter hasil tanaman meliputi panjang tongkol, diameter tongkol, berat tongkol berkelobot, berat tongkol tanpa kelobot, dan berat pipilan kering. Data dianalisis menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA) pada taraf kepercayaan 95%. Dilanjutkan dengan uji *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT), serta uji korelasi Pearson untuk mengetahui hubungan antara parameter.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Tanah Awal dan Pupuk

Tanah Inceptisol pada lokasi penelitian menunjukkan tingkat kesuburan yang relatif rendah, ditandai dengan kandungan C-organik yang sangat rendah meskipun pH H₂O tergolong netral dan kapasitas tukar kation (KTK) berada pada kategori sedang. Rendahnya kandungan C-organik ini mengindikasikan terbatasnya sumber bahan organik sebagai penyumbang muatan negatif tanah. Kondisi tersebut sejalan dengan karakteristik umum tanah Inceptisol di daerah tropis yang umumnya memiliki kandungan bahan organik rendah akibat laju dekomposisi yang tinggi serta intensitas pencucian yang besar (Soil Survey Staff, 2022). Nilai KTK pada tanah tidak hanya dipengaruhi oleh bahan organik, tetapi juga oleh fraksi liat dan jenis mineral liat yang dominan (Weil & Brady, 2017). Meskipun kandungan C-organik rendah,

nilai KTK masih dapat berada pada kategori sedang apabila didukung oleh kandungan liat tertentu (Maftuh *et al.*, 2025).

Tabel 2. Karakteristik Tanah Inceptisol Jatikuwung

No	Sifat Kimia	Nilai	Harkat
1.	N total (%)	0,14	Rendah
2.	P-tersedia (ppm)	3,00	Sangat Rendah
3.	K-tersedia (me/100g)	2,20	Sangat Tinggi
4.	Fe-tersedia (ppm)	2,54	Marginal
5.	C-Organik (%)	0,37	Sangat Rendah
6.	KTK (me/100g)	22,89	Sedang
7.	pH H ₂ O	6,93	-

Keterangan: Pengharkatan merujuk pada Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk, 2023.

Berdasarkan hasil analisis tanah awal (Tabel 2), kandungan N-total tergolong rendah, yang mengindikasikan terbatasnya suplai nitrogen bagi tanaman jagung pada fase awal pertumbuhan. Kandungan N-total tanah Inceptisol rendah karena dipengaruhi oleh pencucian bersama air drainase, penguapan (volatilisasi), dan penyerapan oleh tanaman (Hakim *et al.*, 2022). Ketersediaan hara P pada tanah awal tergolong sangat rendah, menunjukkan bahwa fosfor menjadi faktor pembatas utama pada tanah Inceptisol. Rendahnya ketersediaan P pada tanah ini berkaitan dengan tingginya fiksasi fosfat oleh kation Fe dan Al, yang menyebabkan P berada dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman. Inceptisol ber-pH agak masam memiliki ketersediaan P rendah karena keterikatan kuat oleh ion Al dan Fe yang mengikat ion fosfat menjadi tidak tersedia bagi tanaman (Aprilia *et al.*, 2020). Berbeda dengan N dan P, kandungan K-tersedia pada tanah awal tergolong tinggi. Ketersediaan K yang tinggi tidak selalu diikuti oleh respons pertumbuhan tanaman yang optimal apabila tidak diimbangi dengan kecukupan unsur hara lain, khususnya N, P, dan unsur mikro. Ketidakeimbangan unsur hara menjadi penyebab penurunan efisiensi

pemanfaatan hara oleh tanaman jagung (Damanhuri *et al.*, 2022). Ketersediaan Fe-tersedia pada tanah awal berada pada kategori marginal, yang mencerminkan dominasi Fe dalam bentuk teroksidasi dan kurang tersedia bagi tanaman. Meskipun demikian, keberadaan Fe aktif dalam tanah Inceptisol tetap berperan penting dalam proses fiksasi P, sehingga memperkuat keterbatasan P-tersedia. Kondisi ini sejalan dengan hasil penelitian Kaur, (2019) yang menunjukkan adanya potensi interaksi antagonistik antara Fe dan P sejak kondisi awal tanah.

Ketersediaan Unsur Hara P dan Fe

Ketersediaan fosfor (P) tanah dipengaruhi oleh keseimbangan pemupukan antara unsur hara makro dan mikro. Nilai P-tersedia tertinggi terdapat pada perlakuan 1 NPK + 5 L/ha pupuk mikro (F) sebesar 8,0294 ppm, yang tidak berbeda nyata dengan perlakuan $\frac{3}{4}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro (E) sebesar 7,8231 ppm. Perlakuan E menunjukkan nilai 4,76% lebih tinggi dibandingkan dosis NPK rekomendasi (B), namun secara statistik tidak berbeda nyata (Tabel 3). Kondisi ini menunjukkan bahwa pengurangan dosis NPK sebesar 25% tetap mampu mempertahankan ketersediaan P apabila diimbangi dengan pemberian pupuk mikro. Nilai P-tersedia terendah terdapat pada perlakuan kontrol (A) sebesar 2,9730 ppm, yang menunjukkan bahwa tanpa penambahan sumber P, ketersediaan P pada tanah Inceptisol tetap rendah. Tanah Inceptisol memiliki kecenderungan fiksasi P yang tinggi akibat dominasi kation Fe dan Al, sehingga sebagian besar P berada dalam bentuk tidak tersedia (Aprilia *et al.*, 2020). Pemberian pupuk fosfat seperti SP-36 berperan sebagai sumber utama dalam meningkatkan cadangan P tersedia di dalam tanah (Lestari *et al.*, 2024). Peningkatan P-tersedia terjadi pada perlakuan kombinasi pupuk makro dan mikro, yang menunjukkan bahwa pupuk mikro berperan dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan P. Unsur mikro seperti Zn, Cu, dan Fe berfungsi sebagai kofaktor enzim, khususnya enzim fosfatase, yang mempercepat mineralisasi P organik menjadi ortofosfat yang tersedia bagi tanaman (Maharajan *et al.*, 2023). Aktivitas enzim tersebut meningkatkan pelepasan P dari bentuk terikat sehingga fraksi P tersedia menjadi lebih besar (Baiq *et al.*, 2023). Mekanisme ini menunjukkan bahwa peran utama unsur mikro berada pada proses biologis tanah, bukan sebagai sumber langsung P. Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa P-tersedia memiliki hubungan sangat kuat dan signifikan dengan parameter hasil tanaman. Nilai korelasi dengan panjang tongkol sebesar 0,933**, diameter tongkol 0,944**, berat tongkol berkelobot 0,968**, dan berat pipilan/1000 biji 0,961**. Hubungan ini menunjukkan bahwa peningkatan ketersediaan P di dalam tanah berkontribusi langsung terhadap peningkatan produktivitas tanaman jagung. Ketersediaan P yang tinggi meningkatkan proses pembentukan energi (ATP) dan perkembangan jaringan generatif sehingga berdampak pada peningkatan hasil tanaman (Wu *et al.*, 2025). Perlakuan dengan dosis NPK rendah ($\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ NPK) masih meningkatkan P tersedia, namun nilainya lebih rendah dibandingkan perlakuan dengan pupuk mikro dosis penuh. Perlakuan E dan F secara konsisten menunjukkan nilai P-tersedia tertinggi, sehingga menegaskan bahwa keseimbangan antara pupuk makro dan mikro menjadi faktor penting

dalam meningkatkan ketersediaan dan efisiensi pemanfaatan P pada tanah Inceptisol. Integrasi pemupukan tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi hara melalui perbaikan aktivitas biologis tanah (Adilöglu, 2020).

Tabel 3. Pengaruh Perlakuan terhadap Ketersediaan P dan Fe

Kode	P-tersedia (ppm)	Fe-tersedia (ppm)
A	2,9730 ^a	2,6028 ^a
B	7,4677 ^e	2,6322 ^a
C	4,4667 ^b	4,2376 ^e
D	5,8914 ^c	4,2213 ^e
E	7,8231 ^{ef}	3,9554 ^d
F	8,0294 ^f	3,6358 ^c
G	6,4684 ^d	3,2342 ^b
H	6,8519 ^d	3,2348 ^b
I	7,4144 ^e	3,9327 ^c

Keterangan: Angka pada kolom yang sama dan diikuti huruf yang berbeda menunjukkan hasil yang beda nyata pada uji DMRT ($\alpha = 0,05$).

Ketersediaan Fe tanah menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan ketersediaan P. Nilai Fe-tersedia tertinggi terdapat pada perlakuan $\frac{1}{4}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro (C) sebesar 4,2376 ppm dan tidak berbeda nyata dengan perlakuan $\frac{1}{2}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro (D) sebesar 4,2213 ppm. Perlakuan C meningkatkan Fe-tersedia sebesar 62,9% dibandingkan kontrol (A), sedangkan perlakuan D menunjukkan peningkatan yang relatif sama. Nilai Fe-tersedia pada perlakuan dengan dosis NPK lebih tinggi yang dikombinasikan dengan pupuk mikro berada pada kisaran lebih rendah, yaitu 3,6358–3,9554 ppm, sedangkan perlakuan NPK rekomendasi (B) tidak berbeda nyata dengan kontrol. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan dosis NPK tidak selalu diikuti oleh peningkatan ketersediaan Fe. Ketersediaan Fe pada tanah Inceptisol lebih responsif terhadap penambahan pupuk mikro dibandingkan pupuk makro. Respons ini menunjukkan bahwa sumber Fe dari pupuk mikro lebih menentukan dibandingkan kontribusi tidak langsung dari pupuk makro terhadap dinamika Fe tanah. Peningkatan ini berkaitan dengan suplai Fe dalam bentuk yang lebih mudah larut serta peningkatan stabilitas Fe dalam larutan tanah melalui mekanisme kelasi (Rahmayuni *et al.*, 2023). Transformasi Fe di dalam tanah dipengaruhi oleh kondisi redoks dan pH tanah. Fe dalam bentuk teroksidasi (Fe^{3+}) umumnya tidak larut dan terikat pada mineral oksida, sedangkan Fe dalam bentuk tereduksi (Fe^{2+}) lebih larut dan tersedia bagi tanaman (Shihab *et al.*, 2025). Perubahan kondisi lingkungan tanah, seperti peningkatan kelembapan atau kondisi reduktif, dapat mendorong reduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} sehingga meningkatkan kelarutan Fe. Nilai pH tanah juga mempengaruhi kelarutan Fe, di mana peningkatan pH menyebabkan terbentuknya $Fe(OH)_3$ yang tidak larut, sehingga menurunkan ketersediaan Fe (Cieschi *et al.*, 2021). Keberadaan Fe dalam bentuk terikat dari pupuk mikro menjaga Fe tetap berada dalam larutan tanah dan mencegah presipitasi kembali menjadi bentuk tidak tersedia. Peningkatan dosis NPK, khususnya unsur P, berpengaruh terhadap penurunan ketersediaan Fe melalui pembentukan kompleks Fe–P yang kurang larut. Ion fosfat (PO_4^{3-}) bereaksi dengan Fe^{3+} membentuk senyawa seperti $FePO_4$ yang memiliki kelarutan rendah dalam tanah (Hamedani *et al.*, 2023). Reaksi ini berlangsung melalui proses adsorpsi spesifik

maupun presipitasi, sehingga ion Fe terikat dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman. Kondisi ini semakin kuat pada pH netral hingga agak masam, di mana interaksi antara Fe dan P cenderung membentuk senyawa stabil yang sulit larut. Mekanisme tersebut menjelaskan adanya hubungan antagonistik antara Fe dan P dalam tanah. Perlakuan tanpa pupuk mikro menunjukkan nilai Fe-tersedia yang relatif rendah, yang mencerminkan dominasi Fe dalam bentuk teroksidasi dan terjerap pada mineral tanah. Penambahan pupuk mikro yang mengandung Fe meningkatkan ketersediaan Fe melalui suplai langsung dan perubahan bentuk Fe menjadi lebih larut (Sitompul *et al.*, 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa pemupukan makro saja belum mampu meningkatkan ketersediaan Fe secara optimal pada tanah Inceptisol. Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa hubungan antara Fe-tersedia dan parameter hasil tanaman relatif rendah dan tidak signifikan. Nilai korelasi Fe-tersedia dengan panjang tongkol ($r = 0,096$), diameter tongkol ($r = 0,188$), dan berat pipilan ($r = 0,113$) menunjukkan bahwa ketersediaan Fe tidak secara langsung mempengaruhi peningkatan hasil tanaman. Hubungan antara P-tersedia dan Fe-tersedia juga tergolong rendah ($r = 0,152$), yang menunjukkan bahwa dinamika Fe dalam tanah lebih dipengaruhi oleh faktor spesifik seperti bentuk kimia dan keberadaan pupuk mikro dibandingkan interaksi langsung dengan P. Pengelolaan hara Fe pada tanah Inceptisol memerlukan keseimbangan antara pupuk makro dan mikro agar ketersediaannya tetap optimal serta tidak menimbulkan interaksi negatif dengan unsur hara lain.

Hasil Produksi Tanaman Jagung

Peningkatan hasil produksi jagung pada berbagai perlakuan imbalan pupuk makro–mikro menunjukkan bahwa respons tanaman ditentukan oleh ketersediaan hara dan efisiensi pemanfaatannya di dalam tanaman. Perlakuan $\frac{3}{4}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro (E) menghasilkan komponen hasil tertinggi atau setara dengan perlakuan terbaik, dengan peningkatan panjang tongkol sebesar 46,9%, diameter tongkol 34,9%, berat tongkol 37,3%, dan berat pipilan 23,0% dibandingkan kontrol (A) (Tabel 4). Peningkatan ini tidak hanya berkaitan dengan pembentukan energi (ATP), tetapi juga dengan peran fosfor dalam pembelahan sel, perkembangan sistem perakaran, serta pembentukan organ reproduktif seperti tongkol dan biji. Fosfor berperan dalam transfer energi, sintesis asam nukleat, serta pembentukan jaringan meristem yang menentukan ukuran dan jumlah biji (Nazira *et al.*, 2023). Peningkatan hasil tanaman berkaitan erat dengan peningkatan ketersediaan hara tanah yang diikuti oleh efisiensi serapan hara oleh tanaman. Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa P-tersedia memiliki hubungan sangat kuat dengan parameter hasil, seperti berat tongkol ($r = 0,968^{**}$) dan berat pipilan ($r = 0,961^{**}$), yang menunjukkan bahwa peningkatan status hara tanah secara langsung meningkatkan produktivitas tanaman. Hubungan ini menunjukkan bahwa ketersediaan hara yang tinggi di dalam tanah meningkatkan peluang penyerapan oleh akar dan selanjutnya meningkatkan akumulasi biomassa serta hasil generatif. Penambahan pupuk mikro berperan

dalam meningkatkan efisiensi pemupukan melalui pengaruhnya terhadap proses fisiologis dan biokimia tanaman (Nugroho *et al.*, 2023). Unsur mikro seperti Fe dan Zn berfungsi sebagai kofaktor enzim dalam fotosintesis dan respirasi, sedangkan B berperan dalam pembelahan sel dan pembentukan bunga serta biji. Aktivitas enzimatik yang meningkat mendorong penyerapan dan pemanfaatan N, P, dan K menjadi lebih efisien, sehingga tanaman tetap mampu menghasilkan biomassa dan hasil yang tinggi meskipun dosis pupuk makro dikurangi (Wang *et al.*, 2022).

Tabel 4. Pengaruh Pemupukan terhadap Hasil Tanaman Jagung

Kode	Panjang Tongkol (cm)	Diameter Tongkol (cm)	Berat Tongkol (g)	Berat Pipilan (g/1000 biji)
A	21,3 ^a	4,59 ^a	150,78 ^a	278,7 ^a
B	28,6 ^{cd}	5,95 ^{de}	201,91 ^{de}	325,0 ^e
C	22,2 ^b	5,19 ^b	165,43 ^b	286,3 ^b
D	24,5 ^b	5,45 ^{cd}	179,14 ^c	306,0 ^c
E	31,3 ^e	6,19 ^{ef}	207,06 ^{fg}	342,7 ^f
F	31,5 ^e	6,43 ^f	208,62 ^g	343,0 ^f
G	27,0 ^c	5,68 ^{cd}	198,37 ^d	317,7 ^d
H	28,2 ^{cd}	5,91 ^{de}	200,79 ^{de}	319,3 ^d
I	29,1 ^d	5,95 ^{de}	203,24 ^{ef}	325,3 ^e

Keterangan: Angka pada kolom yang sama dan diikuti huruf yang berbeda menunjukkan hasil yang beda nyata pada uji DMRT ($\alpha = 0,05$).

Perlakuan $\frac{3}{4}$ NPK + pupuk mikro (E) menunjukkan hasil yang relatif setara dengan perlakuan 1 NPK + pupuk mikro (F), dengan selisih hanya 0,1–3,7% pada seluruh parameter hasil. Perbedaan yang kecil ini menunjukkan adanya fenomena *diminishing return* dalam pemupukan, di mana peningkatan dosis pupuk tidak lagi memberikan peningkatan hasil yang signifikan setelah kebutuhan tanaman tercukupi (Xiong & Zhao, 2024). Kondisi ini menunjukkan bahwa efisiensi pemupukan lebih ditentukan oleh keseimbangan hara dibandingkan peningkatan dosis secara berlebihan. Perlakuan kontrol (A) menunjukkan hasil terendah pada seluruh parameter, yang berkaitan dengan kondisi kesuburan tanah awal yang rendah, terutama kandungan P-tersedia yang sangat rendah dan Fe-tersedia yang berada pada kategori marginal. Kondisi tersebut membatasi perkembangan sistem perakaran dan aktivitas metabolisme tanaman, sehingga pembentukan tongkol dan pengisian biji tidak berlangsung optimal (Asril *et al.*, 2023). Perlakuan dengan dosis NPK rendah ($\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ NPK) yang dikombinasikan dengan pupuk mikro menunjukkan peningkatan hasil dibandingkan kontrol, namun belum mampu menyamai perlakuan dosis sedang hingga tinggi. Keterbatasan suplai N dan P pada perlakuan ini membatasi pembentukan biomassa vegetatif dan perkembangan organ generatif seperti tongkol dan biji. Nitrogen berperan dalam pembentukan daun dan klorofil, sedangkan fosfor berperan dalam pembentukan energi dan perkembangan jaringan reproduktif, sehingga kekurangan kedua unsur tersebut menyebabkan hasil tanaman tetap lebih rendah meskipun efisiensi fisiologis tanaman telah ditingkatkan oleh pupuk mikro (Solihin *et al.*, 2024). Pola peningkatan hasil menunjukkan bahwa keseimbangan hara makro

dan mikro menjadi faktor utama dalam menentukan produktivitas jagung pada tanah Inceptisol. Kombinasi pupuk makro dan mikro mampu meningkatkan efisiensi fisiologis tanaman, memperbaiki penyerapan hara, serta mempertahankan hasil tinggi meskipun dosis pupuk makro dikurangi. Pendekatan pemupukan berimbang ini relevan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan produktivitas pada tanah dengan tingkat kesuburan rendah.

KESIMPULAN

Imbangan pupuk makro dan mikro berpengaruh terhadap ketersediaan fosfor (P) dan besi (Fe) tanah serta hasil tanaman jagung (*Zea mays* L.) pada tanah Inceptisol. Pemberian pupuk mikro bersama NPK meningkatkan ketersediaan P melalui peningkatan efisiensi pemanfaatan hara, sedangkan ketersediaan Fe lebih dipengaruhi oleh penambahan pupuk mikro dibandingkan peningkatan dosis pupuk makro. Perlakuan $\frac{3}{4}$ NPK + 5 L/ha pupuk mikro menghasilkan ketersediaan P yang tinggi dan tidak berbeda nyata dengan perlakuan 1 NPK + 5 L/ha pupuk mikro sebagai nilai tertinggi. Ketersediaan Fe tertinggi diperoleh pada kombinasi NPK dosis rendah hingga sedang dengan pupuk mikro, yang menunjukkan respons Fe yang lebih sensitif terhadap penambahan unsur mikro. Peningkatan ketersediaan P di dalam tanah berkorelasi kuat dengan peningkatan hasil tanaman, sedangkan ketersediaan Fe tidak menunjukkan hubungan langsung dengan parameter hasil. Hasil tanaman tertinggi dicapai pada perlakuan $\frac{3}{4}$ NPK + pupuk mikro dan tidak berbeda nyata dengan perlakuan 1 NPK + pupuk mikro, yang menunjukkan bahwa peningkatan dosis NPK tidak selalu meningkatkan hasil apabila kebutuhan hara tanaman telah tercukupi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa keseimbangan pemupukan makro dan mikro lebih efektif dalam meningkatkan ketersediaan hara dan produktivitas jagung dibandingkan peningkatan dosis pupuk makro secara tunggal. Pendekatan ini memungkinkan efisiensi penggunaan pupuk melalui pengurangan dosis NPK tanpa menurunkan hasil tanaman pada tanah Inceptisol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Pertanian Universitas Sebelas Maret atas fasilitas laboratorium dan lahan penelitian yang diberikan, serta kepada dosen pembimbing dan tim analis Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah atas arahan, bantuan teknis, dan dukungan selama proses pengumpulan dan pengolahan data. Penghargaan juga disampaikan kepada rekan-rekan yang turut membantu dalam kegiatan lapangan dan diskusi ilmiah yang berkontribusi pada penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Adiloğlu, S. (2020). Relation of chelated iron (Eddha-fe) applications with iron accumulation and some plant nutrient elements in basil (*ocimum basilicum* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(4), 3471–3479. <https://doi.org/10.15244/pjoes/128736>

Amelia, D., Salim, E. H., & Mulyani, O. (2017). Pengaruh Kombinasi Pupuk Hara Mikro Cair Dengan N,P,K terhadap Kadar Cobalt dan Hasil Tanaman Jagung (*Zea mays* L.) 'Pioneer 12' pada Fluventic Eutrudepts. *Soilrens*, 15(2), 26–32.

- <https://doi.org/10.24198/soilrens.v15i2.21462>
- Aprilia, N. A., Ab, B., & Kusnarta, G. M. (2020). Analisis Status Hara Fosfor dan Kalium Tanah Inceptisol pada Lahan Sawah di Kabupaten Lombok Timur. *Agroteksos*, 30(2), 1–13. <https://doi.org/10.21776/ub.jtstl.2019.006.2.19>
- Asril, M., Lestari, W., Basuki, Sanjaya, M. F., Firgiyanto, R., Manguntungi, B., Sudewi, S., Swandi, M. K., Paulina, M., & Kunusa, W. R. (2023). *Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan* (M. J. F. Sirait (ed.); 1st ed.). Yayasan Kita Menulis.
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Luas Panen dan Produksi Jagung di Indonesia 2023* (Direktorat Statistik Tanaman Pangan Hortikultura dan Perkebunan (ed.); 1st ed., Vol. 1). Badan Pusat Statistik. Retrieved from <https://www.bps.go.id/id/publication/2024/08/16/fa2d1e4d5414f76a9bc3c713/luas-panen-dan-produksi-jagung-di-indonesia-2023.html>
- Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk. (2023). Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk. In I. A. Sipahutar, H. Wibowo, A. F. Siregar, L. R. Widowati, & T. Rostaman (Eds.), *Petunjuk Teknis* (3rd ed.). Retrieved from <https://repo.upertis.ac.id/1634/1/petunjuk-teknis-analisis-kimia-tanah-tanaman-air-dan-pupuk.pdf>
- Basuki, & Sari, V. K. (2019). The Effectiveness of Dolomite in Maintaining Soil pH in Inceptisol Sugarcane Plantation Blimbing Djatiroto. *Buletin Tanaman Tembakau, Serat & Minyak Industri*, 11(2), 58–64. <https://doi.org/10.21082/btism.v11n2.2019.58-64>
- Cieschi, M. T., de Francisco, M., Herrero, P., Sánchez-Marcos, J., Cuevas, J., Esteban, E., Lucena, J. J., & Yunta, F. (2021). Synthesis and characterization of nano Fe and Mn (Hydr)oxides to be used as natural sorbents and micronutrient fertilizers. *Agronomy*, 11(9), 1–16. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091876>
- Damanhuri, Widodo, T. W., & Fauzi, A. (2022). Pengaturan Keseimbangan Nitrogen dan Magnesium untuk Meningkatkan Pertumbuhan dan Produksi Jagung (*Zea Mays* L.). *Jurnal Ilmiah Inovasi*, 22(1), 10–15. <https://doi.org/10.25047/jii.v22i1.2842>
- Fauziah, F., Wulansari, R., & Rezamela, E. (2018). Pengaruh Pemberian Pupuk Mikro Zn dan Cu serta Pupuk Tanah terhadap Perkembangan *Empoasca* sp. pada Areal Tanaman Teh. *Agrikultura*, 29(1), 26. <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v29i1.16923>
- Fiqriansyah, M., Putri, S. A., Syam, R., Rahmadani, A. S., Frianie, T. N., R.L, S. A., N, Y. I. S., Adhayani, A. N., Nurdiana, Fauzan, Bachok, N. A., Manggabarani, A. M., & Utami, Y. D. (2021). Teknologi Budidaya Tanaman Jagung (*Zea mays*) dan Sorgum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Jurusan Biologi FMIPA UNM* (1st ed.). Jurusan MIPA UNM. Retrieved from <https://eprints.unm.ac.id/21953/1/BUKU%20BUDI%20DAYA%20JAGUNG%20%20SORGUM%20BALI%20TSERIAL%202021.pdf>
- Hakim, F. K., Sofyan, E. T., Sudirja, R., Joy, B., Yuniarti, A., & Herdiyantoro, D. (2022). The Application of

- Slow Release NPK Fertilizer on Inceptisols to Changes of Soil Chemical Properties and Growth of Sweet Corn (*Zea mays* L. *saccharata*). *International Journal of Environmental, Agriculture & Biothecnology*, 7(3), 18–24. <https://doi.org/10.22161/ijeab.73.3>
- Hakim, N., & Hermansah. (2025). *Dasar - Dasar Ilmu Tanah* (N. Hakim & Hermansah (eds.); 2nd ed.). Andalas University Press.
- Hamedani, S. R., Cardarelli, M., Roupheal, Y., Bonini, P., Colantoni, A., & Colla, G. (2023). Comparative Environmental Assessment of the Iron Fertilisers' Production: Fe-Biochelate versus Fe-EDDHA. *Sustainability (Switzerland)*, 15(9), 7488. <https://doi.org/10.3390/su15097488>
- Hartono, A., Nadalia, D., & Satria, P. H. (2022). Aluminium Dapat Dipertukarkan dan Fosfor Tersedia pada Tanah di Provinsi Bangka Belitung. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 24(1), 20–24. <https://doi.org/10.29244/jitl.24.1.20-24>
- Kaur, H. (2019). Availability of Micronutrient Cations in Soils as Influenced by Phosphorus Fertilization. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(09), 1946–1952. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.809.224>
- Khastini, R. O., Avilia, A., Salsabila, N., Febrianty, R. E., Aisy, R., & Frandista, S. C. (2024). Literature Review: Peranan Acaulospora Terhadap Penyerapan Fosfor Pada Akar Tanaman Singkong. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 11(2), 301–308. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.2.1>
- Lestari, Y., Suswati, D., & Chandra, T. O. (2024). Status Unsur Hara Nitrogen, Fosfor Dan Kalium Tanah Inceptisol Di Lahan Kelapa Sawit Desa Labang Kecamatan Belimbing Kabupaten Melawi. *Pedontropika: Jurnal Ilmu Tanah Dan Sumber Daya Lahan*, 10(1), 56–65. <https://doi.org/10.26418/pedontropika.v10i1.62230>
- Maftuh, M., Bakti, L. A. A., & Baharudin AB. (2025). Kajian Sifat Kimia Tanah Inceptisol pada Lahan Hutan Produksi Di Lombok. *JSTL: Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, x(2), 1–16. <https://doi.org/10.29303/jstl.v0i0.267>
- Maharajan, T., Ajeesh Krishna, T. P., Rakkammal, K., Ramakrishnan, M., Ceasar, S. A., Ramesh, M., & Ignacimuthu, S. (2023). Identification of QTL Associated with Agro-Morphological and Phosphorus Content Traits in Finger Millet under Differential Phosphorus Supply via Linkage Mapping. *Agriculture (Switzerland)*, 13(262), 1–21. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020262>
- Masinambow, D. R., Polii, B., & Rotinsulu, W. (2021). Pemetaan Lahan Marjinal Sebagai Potensi Lahan Perkebunan Cengkih Di Kecamatan Kakas, Kakas Barat Dan Lembean Timur Dengan Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Agri-SosioEkonomi Unsrat*, 17(2), 591–598. <https://doi.org/10.35791/agrsosek.15.2.2019.24188>
- Murnita, & Taher, Y. A. (2021). Dampak Pupuk Organik Dan Anorganik Terhadap Perubahan Sifat Kimia Tanah Dan Produksi Tanaman Padi (*Oriza Sativa* L.) Effect Of Organic And Inorganic Fertilizers On Soil Chemical Properties And Rice Plant Production(*Oriza Sativa* L.). *MENARA Ilmu*, 15(2), 67–76. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.010.1.18>
- Nazira, A., Hera, N., & Ifan, M. (2023). Application of Nutritan Liquid Fertilizer with Some Concentrations on Growth and Yield of Corn (*Zea mays* L.). *PROSIDING: Seminar Nasional Integrasi Pertanian Dan Peternakan*, 1(1), 147–154. <https://semnasfpp.uin-suska.ac.id/index.php/snipp/article/view/73>
- Nugroho, G. A., Kusumarini, N., Romadhoni, W., & Kurniawan, S. (2023). Pengaruh pemupukan Unsur Mikro pada Kesuburan dan Produksi tanaman Jagung. *Jurnal Online Pertanian Tropik*, 10(3), 19–27. <https://doi.org/10.32734/jpt.v10i3.14388>
- Odugbenro, G. O., Liu, Z., Oluwasemire, K. O., Erinle, K. O., & Sun, Y. (2023). Soil quality alteration and maize (*Zea mays* L.) yield after organic amendments application to a Pellic Vertisol in China. *Soil Science Annual*, 74(3 March), 1–9. <https://doi.org/10.37501/soilsa/177042>
- Purwanto, R. J., Syafrullah, Astuti, D. T., & Adi Safrudin. (2021). Pertumbuhan dan Produksi Jagung Manis (*Zea mays saccharata* Sturt) dengan Pemberian Berbagai Jenis Pupuk Organik. *Klorofil*, 16(1), 33–38. <https://doi.org/10.30606/sungkai.v11i2.2058>
- Puspaningrum, D., & Djabar, M. (2018). Analisis Sifat Fisik Tanah Pada Areal Bekas Tebangan Hutan Tanaman Industri (Hti) Kabupaten Gorontalo Utara Provinsi Gorontalo. *Gorontalo Journal of Forestry Research*, 1(1), 15. <https://doi.org/10.32662/gjfr.v1i1.72>
- R.P, B. F. P., Susilowati, L. E., Arifin, Z., Mashum, M., & Dewi, R. A. S. (2023). Uji Kombinasi Pupuk Anorganik Dan Pupuk Bio-Organik P Terhadap Ketersediaan P Dalam Tanah, Serapan P Tanaman, Dan Populasi Bakteri Pelarut Fosfat Pada Tanaman Kedelai (*Glycine Max* L. Merrill). *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 9(4), 675–688. <https://doi.org/10.29303/jstl.v9i4.481>
- Rahmayuni, E., Anwar, S., Nugroho, B., & Indriyati, L. T. (2023). *Perilaku Fraksi P Inorganik, Al, Fe dan Mn dalam Tanah di Tingkat Perkembangan pada Berbeda Hutan, Lahan Kering dan Sawah* [IPB University]. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/131534>
- Shihab, A., Baharuddin, & Swardji. (2025). Penilaian Status Unsur Hara Fe (Besi) pada Tanah Inceptisol di Lahan Sawah Intensif di Kecamatan Narmada. *Journal of Soil Quality and Management*, 1(1), 15–20. <https://doi.org/10.29303/jsqm.v2i1.111>
- Sitompul, K. N., Kusumiyati, & Mubarak, S. (2023). Pengaruh Jenis dan Konsentrasi Pupuk Fe Terhadap Pertumbuhan Tomat 'Red Beefsteak.' *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 8(3), 175–185. <https://doi.org/10.24002/biota.v8i3.7044>
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (13th ed.). USDA Natural Resources Conservation Service. Retrieved from <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Solihin, E., Sudirja, R., & Yuniarti, A. (2024). Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Jagung Manis

- (*Zea Mays Saccharata* Sturt) Akibat Pemberian Dosis Pupuk Majemuk Npk. *AGRO TATANEN: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 6(2), 61–67. <https://doi.org/10.33061/innofarm.v24i1.7271>
- Syamsiyah, J., Minardi, S., Herdiansyah, G., Cahyono, O., & Mentari, F. C. (2023). Physical Properties of Alfisols, Growth and Products of Hybrid Corn Affected by Organic and Inorganic Fertilizer. *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, 38(1), 99–112. <https://doi.org/10.20961/carakatani.v38i1.65014>
- Tustiyani, I., Suharno, Daud, R. J., & Rifkiananto, N. (2025). Kajian Pemupukan NPK pada Tanaman Jagung Manis di Kecamatan Prambanan Kabupaten. *Agroteknika*, 8(3), 523–531. <https://agroteknika.id/index.php/agtk/article/view/419>
- Wang, S., Xu, L., & Hao, M. (2022). Impacts of Long-Term Micronutrient Fertilizer Application on Soil Properties and Micronutrient Availability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316358>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (D. Fox (ed.); 15th ed.). Pearson Education, Inc. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition
- Wu, W., Zhang, Y., Turner, B. L., He, Y., Chen, X., Che, R., Cui, X., Liu, X., Jiang, L., & Zhu, J. (2025). Organic amendments promote soil phosphorus related functional genes and microbial phosphorus cycling. *Geoderma*, 456(June 2024), 117247. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117247>
- Xiong, C., & Zhao, X. (2024). Impacts of chemical fertilizer reduction on grain yield: A case study of China. *PLoS ONE*, 19(3 March), 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298600>