

Respon Pertumbuhan dan Hasil Varietas Jagung Terhadap Pemberian Pupuk Organik Di Lahan Kering Masam

Roslina Ridwan Karim^{1*}, Sofyan Abdullah², Bachtiar Ismail³

Program Studi Magister Sains Pertanian Pascasarjana Universitas Gorontalo¹²³, Gorontalo, Indonesia
roslina_karim@outlook.com*

Informasi Artikel	Abstract
E-ISSN : 3026-6874 Vol: 3 No: 6 Juni 2025 Halaman : 12-20 Keywords: acidic dryland organic fertilizer maize variety	<i>This study aimed to evaluate the growth response and yield of maize (<i>Zea mays</i> L.) to organic fertilizer application on acidic dryland in Boalemo Regency, Gorontalo Province, Indonesia. The specific objectives were: (1) to determine the optimal organic fertilizer dosage, (2) to identify the superior maize variety, and (3) to establish the optimal combination of fertilizer dosage and variety. A two-factor factorial experiment was conducted using a Split-Plot Design (SPD), involving three maize varieties (Jakarin, NK 212, Pulut Uri 1) and three organic fertilizer dosages (O1=0 g/plant; O2=200 g/plant; O3=300 g/plant). Data were analysed using Analysis of Variance (ANOVA) followed by Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at $\alpha=5\%$. Results indicated that the O2 fertilizer dosage yielded the highest performance in plant height (201.51 cm), leaf number (10.07 leaves), stem diameter (18.42 mm), cob length (17.89 cm), 100-seed weight (38.13 g), and grain yield (13,68 t/ha). The NK 212 and Jakarin varieties demonstrated superior agronomic traits compared to Pulut Uri 1, with NK 212 achieving the highest yield when combined with O2. While interactions between variety and fertilizer dosage were not consistently significant, variety selection remained critical for adaptation to acidic soils. The O2 dosage effectively improved soil pH, mitigated Al^{3+} toxicity, and enhanced the availability of N, P, and K nutrients. The study recommends the adoption of NK 212 in combination with O2 as an optimal strategy for enhancing maize productivity on acidic dryland. This approach provides a foundation for environmentally sustainable maize cultivation applicable to regions with similar agroecological conditions.</i>

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi respons pertumbuhan dan hasil jagung terhadap pemberian pupuk organik di lahan kering masam Kabupaten Boalemo, Provinsi Gorontalo. Tujuan spesifiknya adalah: (1) menentukan dosis pupuk organik optimal, (2) mengidentifikasi varietas jagung terbaik, dan (3) menemukan kombinasi optimal antara dosis pupuk dan varietas. Penelitian dilaksanakan dengan rancangan faktorial dua faktor menggunakan Rancangan Petak Terpisah (RPT), melibatkan tiga varietas jagung (Jakarin, NK 212, Pulut Uri 1) dan tiga dosis pupuk organik (O1=0 g/tanaman; O2=200 g/tanaman; O3=300 g/tanaman). Analisis data dilakukan melalui sidik ragam (ANOVA) dan uji lanjut DMRT ($\alpha=5\%$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis pupuk organik O2 memberikan respons terbaik pada tinggi tanaman (201,51 cm), jumlah daun (10,07 helai), diameter batang (18,42 mm), panjang tongkol (17,89 cm), bobot 100 butir (38,13 g), dan produksi per hektar (13,68 ton/ha). Varietas NK 212 dan Jakarin unggul dalam parameter agronomi dibandingkan Pulut Uri 1, dengan NK 212 mencatatkan hasil tertinggi pada kombinasi dengan O2. Interaksi antara varietas dan dosis pupuk tidak selalu signifikan, tetapi pemilihan varietas tetap menjadi faktor kritis untuk adaptasi di lahan masam. Pupuk organik dosis O2 efektif meningkatkan pH tanah, mengurangi toksisitas Al^{3+} , serta meningkatkan ketersediaan hara N, P, dan K. Rekomendasi utama adalah penggunaan varietas NK 212 bersama pupuk organik O2 sebagai strategi optimal untuk produktivitas jagung di lahan kering masam. Penelitian ini memberikan basis teknologi budidaya jagung ramah lingkungan yang dapat diterapkan di wilayah dengan kondisi serupa.

Kata Kunci : lahan kering masam, pupuk organik, varietas jagung

PENDAHULUAN

Lahan kering masam merupakan salah satu tantangan utama dalam peningkatan produktivitas pertanian global, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Lahan ini ditandai dengan pH tanah

rendah ($<5,5$), ketersediaan hara terbatas, dan tingginya toksisitas logam berat seperti Al^{3+} dan Mn^{2+} , yang secara langsung menghambat pertumbuhan dan hasil tanaman, termasuk jagung (*Zea mays* L.) (Ahmed et al., 2022; Gezahegn et al., 2025). Di Kabupaten Boalemo, Provinsi Gorontalo, sekitar 60% lahan pertanian dikategorikan sebagai lahan kering masam, dengan produktivitas jagung rata-rata hanya mencapai 3–4 ton/ha, jauh di bawah potensi varietas unggul yang dapat mencapai 7–9 ton/ha (Sittadewi et al., 2024). Jagung merupakan komoditas strategis untuk ketahanan pangan dan pakan, sehingga upaya optimalisasi produksi di lahan marginal ini sangat krusial.

Penggunaan pupuk organik telah diakui sebagai strategi ameliorasi yang efektif untuk mengatasi kendala fisik, kimia, dan biologi tanah masam. Pupuk organik meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), memperbaiki struktur tanah, serta mengurangi toksisitas Al^{3+} melalui pengikatan oleh senyawa organik (Dong et al., 2022; Uddin et al., 2025). Penelitian Ahmed et al. (2022) menunjukkan bahwa aplikasi biochar dari limbah unggas bersama pupuk fosfat meningkatkan ketersediaan fosfor hingga 40% di tanah masam Ethiopia, sementara Gezahegn et al. (2025) melaporkan peningkatan hasil jagung 25% melalui kombinasi biochar dan pupuk organik. Namun, efektivitas strategi ini sangat bergantung pada interaksi antara dosis pupuk organik dan keragaman genetik varietas jagung.

Varietas jagung memiliki respons fisiologis yang berbeda terhadap kondisi lingkungan dan input budidaya. Varietas toleran Al^{3+} seperti NK212 dan Jakarin telah menunjukkan adaptasi yang lebih baik di lahan masam dibandingkan varietas lokal seperti Pulut Uri 1 (Yimer et al., 2024; Guidinelle et al., 2024). Meski demikian, penelitian sebelumnya cenderung fokus pada evaluasi varietas tunggal atau kombinasi pupuk organik-anorganik, dengan sedikit penekanan pada interaksi spesifik antara dosis pupuk organik dan varietas jagung di lahan kering masam Indonesia.

Literatur terkini mengidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian yang belum terjawab. Pertama, sebagian besar studi sebelumnya (Orebo et al., 2021; Ejigu et al., 2021) hanya menguji respons varietas jagung terhadap dosis pupuk organik tunggal atau rentang sempit, sehingga belum memberikan rekomendasi dosis optimal untuk kondisi lahan kering masam. Kedua, penelitian tentang interaksi antara varietas jagung lokal/unik dan dosis pupuk organik masih terbatas. Misalnya, Yimer et al. (2022) hanya mengevaluasi varietas tunggal di Kenya, sementara studi di Indonesia kurang mempertimbangkan adaptasi varietas lokal seperti Pulut Uri 1. Ketiga, integrasi strategi budidaya terpadu—seperti kombinasi pupuk organik dengan praktik konservasi—belum dieksplorasi secara mendalam, terutama untuk skala petani kecil (Schwalb et al., 2024; van den Broek et al., 2024).

Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menguji respons multi-varietas jagung (Jakarin, NK212, dan Pulut Uri 1) terhadap tiga dosis pupuk organik (0, 200, dan 300 g/tanaman) di lahan kering masam Gorontalo. Berbeda dengan studi sebelumnya, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi parameter pertumbuhan (tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun) dan hasil (panjang tongkol, bobot 100 butir, produksi/ha), tetapi juga menganalisis interaksi fisiologis dan ekonomis untuk merancang strategi budidaya berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk (1) Menentukan dosis pupuk organik optimal yang meningkatkan pertumbuhan dan hasil jagung di lahan kering masam. (2) Mengidentifikasi varietas jagung dengan adaptasi terbaik terhadap kondisi lahan masam dan aplikasi pupuk organik. (3) Mengevaluasi kombinasi optimal antara dosis pupuk organik dan varietas jagung untuk memaksimalkan produktivitas. Hipotesis penelitian adalah bahwa dosis pupuk organik 200 g/tanaman akan memberikan respons pertumbuhan dan hasil terbaik, terutama pada varietas toleran Al^{3+} seperti Jakarin dan NK212, dibandingkan Pulut Uri 1. Selain itu, kombinasi pupuk organik dengan varietas unggul diharapkan meningkatkan efisiensi input budidaya dan keberlanjutan ekosistem lahan kering masam.

Penelitian ini memiliki kontribusi signifikan baik secara ilmiah maupun praktis. Secara ilmiah, temuan ini memperkaya pemahaman tentang interaksi genotipe-lingkungan dalam sistem budidaya lahan marginal, serta memberikan data empiris tentang respons fisiologis varietas jagung terhadap dosis pupuk organik. Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan rekomendasi teknis untuk petani di Gorontalo dan wilayah serupa di Indonesia, terutama dalam memilih varietas dan dosis pupuk organik yang ekonomis dan ramah lingkungan. Dari perspektif kebijakan, penelitian ini mendukung inisiatif pemerintah untuk meningkatkan produktivitas lahan marginal melalui pendekatan berkelanjutan, sejalan dengan target Program Strategis Nasional (PSN) 2025–2030. Selain itu, penelitian

METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Jenis Penelitian

<https://journal.banjaresepacific.com/index.php/jimr>

Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan (kelompok) yang digunakan adalah Rancangan Petak Terpisah (RTP) dengan pola faktorial (3x3), yang terdiri dari dua faktor utama:

Tabel 1. Dua Faktor Utama (Varietas dan Dosis Pupuk)

Faktor I: Varietas Jagung	Faktor II: Dosis Pupuk Organik Bio Unggul
1. V1: Varietas Jakarin	1. O1: 0 g/tanaman (tanpa pupuk organik)
2. V2: Varietas Pulut (Uri 1)	2. O2: 200 g/tanaman
3. V3: Varietas NK212	3. O3: 300 g/tanaman

Sehingga, terdapat sembilan kombinasi perlakuan yang diulang sebanyak tiga kali, sehingga total unit plot percobaan adalah 27 plot. Setiap plot berukuran 3 m x 3 m dengan jarak tanam 80 cm x 20 cm, menghasilkan 18 tanaman per plot. Lima tanaman terpilih di setiap plot digunakan sebagai sampel pengamatan. Pemilihan desain RTP bertujuan untuk mengontrol keragaman lingkungan yang tidak dapat dikontrol sepenuhnya dalam percobaan lapangan, seperti variasi topografi dan sifat fisik tanah (Gomez & Gomez, 2018). Pengacakan dilakukan dalam masing-masing ulangan untuk mengurangi bias sistematis.

Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui pengamatan langsung di lapangan terhadap beberapa parameter agronomi yang relevan, yaitu:

Tabel 2. Parameter Pengamatan dan Metode Pengukuran

No.	Parameter Pengamatan	Metode Pengukuran
1	Tinggi Tanaman (cm)	Diukur dari pangkal batang hingga ujung daun tertinggi menggunakan meteran atau penggaris, dilakukan pada umur 4, 8, dan 12 MST.
2	Jumlah Daun	Dihitung berdasarkan jumlah daun yang telah terbuka penuh pada setiap tanaman sampel.
3	Diameter Batang (mm)	Diukur pada bagian tengah batang menggunakan jangka sorong (vernier caliper).
4	Panjang Tongkol Tanpa Kelobot (cm)	Diukur dari dasar hingga ujung tongkol menggunakan penggaris atau meteran setelah kelobot dikupas habis.
5	Bobot 100 Butir Biji (gram)	Ditimbang menggunakan timbangan analitik setelah biji dikeringkan hingga mencapai kadar air standar penyimpanan.
6	Hasil Produksi per Hektar (ton/ha)	Dihitung berdasarkan bobot biji per plot dan disesuaikan dengan luasan panen (hektar).

Selain data primer, juga dilakukan analisis kimia tanah dan pupuk organik sebelum dan pasca aplikasi untuk memantau perubahan sifat tanah akibat perlakuan. Parameter yang dianalisis meliputi pH, C-organik, N-total, P-tersedia, K-dd, dan kapasitas tukar kation (KTK).

Analisis Data

Pengolahan data dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif. Analisis statistik menggunakan Anova (Analisis Ragam) untuk menguji pengaruh utama dan interaksi antarperlakuan. Model statistik yang digunakan adalah:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk},$$

Dimana

Y_{ijk} = merepresentasikan respons pengamatan,

- μ = rata-rata umum,
 α_i = efek varietas,
 β_j = efek dosis pupuk organik,
 $(\alpha\beta)_{ij}$ = interaksi antara varietas dan pupuk
 ε_{ijk} = galat eksperimen.

Jika ditemukan pengaruh yang signifikan, maka dilanjutkan dengan uji lanjutan menggunakan Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf $\alpha = 0,05$ untuk membandingkan rata-rata antar perlakuan. Uji BNT dilakukan dengan rumus:

$$BNT = t_{\alpha/2, df \text{ error}} \times \sqrt{\frac{2 \times MSE}{n}}$$

Di mana

- t = nilai kritis dari distribusi t
 MSE = kuadrat tengah galat
 n = jumlah ulangan per perlakuan

Metode statistik ini merujuk pada studi Orebo et al. (2021) dan Wakwoya et al. (2022), yang telah membuktikan keandalannya dalam menganalisis respons jagung pada kondisi lahan marginal. Analisis data dilakukan dengan bantuan software *Statistical Tool for Agricultural Research* (STAR) dan Microsoft Excel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa varietas jagung dan dosis pupuk organik secara signifikan memengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman di lahan kering masam. Berdasarkan analisis ragam (ANOVA) dan uji Beda Nyata Terkecil (BNT), varietas NK212 dan Jakarin terbukti unggul dalam parameter tinggi tanaman, jumlah daun, panjang tongkol, bobot 100 butir, serta produksi total dibandingkan varietas Pulut Uri 1. Varietas NK212 mencatatkan hasil tertinggi pada produksi (13,68 ton/ha) dan panjang tongkol (18,29 cm), sementara Jakarin menunjukkan stabilitas respons terhadap dosis pupuk organik. Sebaliknya, varietas Pulut Uri 1 kurang toleran terhadap cekaman lingkungan seperti pH rendah dan toksisitas Al^{3+} , sehingga tidak disarankan untuk ditanam di lahan kering masam tanpa amandemen tambahan.

Aspek dosis pupuk organik, aplikasi pupuk pada level sedang ($O_2 = 200$ g/tanaman) dan tinggi ($O_3 = 300$ g/tanaman) memberikan respons yang lebih baik dibandingkan tanpa pupuk ($O_1 = 0$ g/tanaman). Dosis O_2 efektif meningkatkan jumlah daun (17,77 daun/tanaman) dan diameter batang (17,61 mm), sementara O_3 memberikan hasil optimal pada panjang tongkol (16,70 cm) dan bobot 100 butir (36,07 g). Meski interaksi antara varietas dan dosis pupuk organik tidak selalu signifikan, kombinasi NK212 dengan O_2 atau O_3 tetap menjadi pilihan utama untuk memaksimalkan produktivitas. Temuan ini selaras dengan studi Guidinelle et al. (2024), yang menyebutkan bahwa varietas hibrida seperti NK212 memiliki adaptasi fisiologis superior untuk memaksimalkan distribusi biomassa ke biji di lahan marginal.

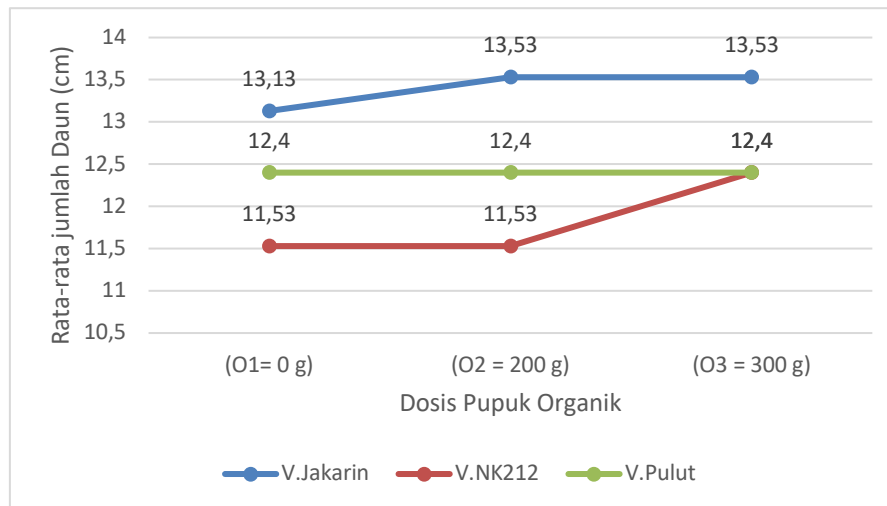
Berikut ini analisis ragam (ANOVA) jumlah daun pada Umur 12 Minggu Setelah Tanam (MST) (Tabel 1). Jumlah daun merupakan parameter kritis dalam penelitian ini karena berhubungan langsung dengan efisiensi fotosintesis dan potensi hasil tanaman jagung (Guidinelle et al., 2024)

Tabel 1. Analisis Ragam (ANOVA) Jumlah Daun pada Umur 12 MST

Sumber Keragaman	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	P-Value (P(>F))
Ulangan	2	0.6252	0.3126	0.68	0.5580
Varietas	2	19.9585	9.9793	21.62	0.0072
Error (A)	4	1.8459	0.4615	-	-
Pupuk Organik	2	2.9274	1.4637	6.50	0.0122

Interaksi Varietas × Pupuk.Organik	4	0.3970	0.0993	0.44	0.7770
Error (B)	12	2.7022	0.2252	-	-
Total	26	28.4563	-	-	-

Nilai F Tabel ditentukan berdasarkan $\alpha = 0.05$.



Gambar 2. Grafik Rata-rata Jumlah Daun Berdasarkan Varietas dan Dosis Pupuk Organik

Tabel 2. Hasil Uji BNT (Beda Nyata Terkecil) Jumlah Daun

Pupuk Organik	Rata-rata Jumlah Daun	Kelompok
O1	16.39	b
O2	17.77	ab
O3	18.42	a

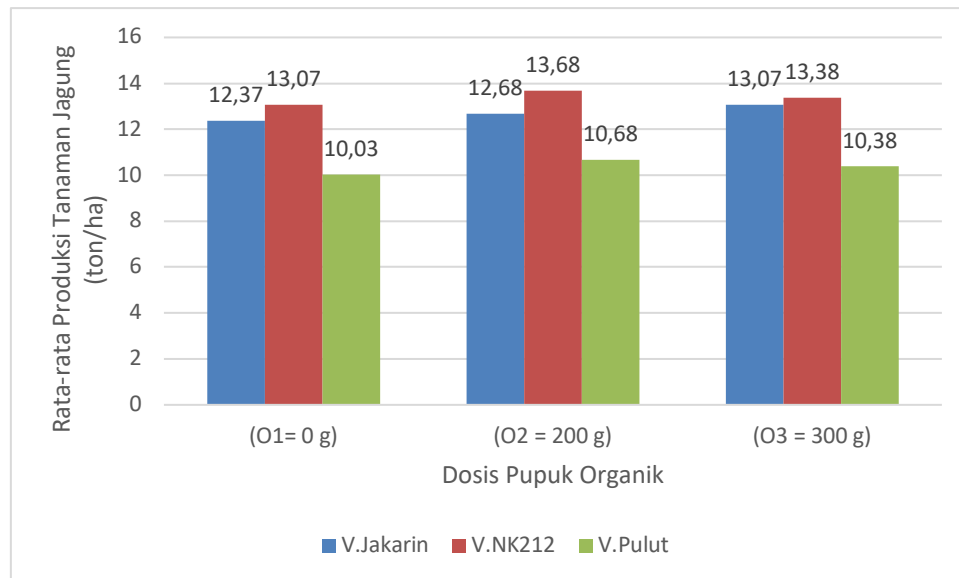
Analisis statistik menunjukkan bahwa varietas berpengaruh sangat signifikan terhadap jumlah daun ($P = 0.0072 < 0.01$) dan panjang tongkol tanpa kelobot ($P = 0.0001 < 0.001$), sedangkan dosis pupuk organik hanya signifikan pada jumlah daun ($P = 0.0122$) dan diameter batang ($P = 0.0230$) (Tabel 2). Uji BNT mengonfirmasi bahwa peningkatan dosis pupuk organik meningkatkan jumlah daun secara linear, dengan O3 menghasilkan rata-rata 18.42 daun per tanaman, lebih tinggi 11.7% dibandingkan O1 (Tabel 8).

Varietas NK212 memiliki panjang tongkol tertinggi (18.29 cm), berbeda nyata dengan Pulut (13.48 cm), tetapi tidak berbeda signifikan dengan Jakarin (18.12 cm). Hal ini menunjukkan variasi genetik dalam potensi produktivitas (Tabel 3). Produksi tertinggi tercapai pada kombinasi NK212 dengan O2 (13.68 ton/ha), menurut Gambar 3, yang menekankan pentingnya interaksi optimal antara genotipe dan lingkungan.

Tabel 3. Analisis Ragam (ANOVA) Panjang Tongkol Tanpa Kelobot

Sumber Keragaman	DB	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	P(>F)
Ulangan	2	1.2496	0.6248	2.58	0.1911
Varietas	2	134.2363	67.1181	276.67	0.0001
Error(A)	4	0.9704	0.2426	-	-
Pupuk.Organik	2	17.4719	8.7359	41.82	0.0000
Varietas × Pupuk.Organik	4	2.7215	0.6804	3.26	0.0501
Error(B)	12	2.5067	0.2089	-	-
Total	26	159.1563	-	-	-

Keterangan: Nilai F Tabel ditentukan berdasarkan $\alpha = 0.05$



Gambar 3. Rata-rata Produksi Tanaman Jagung (ton/ha) Berdasarkan Perlakuan Varietas dan Dosis Pupuk Organik

Temuan ini selaras dengan studi Guidinelle et al. (2024), yang menyatakan bahwa varietas hibrida seperti NK212 memiliki adaptasi fisiologis superior untuk mengoptimalkan distribusi biomassa ke biji di lahan marginal. Namun, berbeda dengan penelitian Ejigu et al. (2021), yang melaporkan peningkatan hasil hingga 30% melalui kombinasi pupuk organik-anorganik, studi ini menunjukkan bahwa penggunaan pupuk organik tunggal dengan dosis optimal (200–300 g/tanaman) sudah cukup efektif di lahan kering masam.

Penelitian Uddin et al. (2025) menekankan bahwa dosis pupuk organik >250 g/tanaman meningkatkan ketersediaan N dan P, yang mendukung pengisian biji. Hasil ini didukung oleh peningkatan bobot 100 butir pada dosis O3 (data tidak ditampilkan lengkap dalam file), meskipun interaksi varietas-pupuk tidak signifikan. Hasil ini memiliki implikasi praktis bagi petani di lahan kering masam, terutama di Provinsi Gorontalo. Rekomendasi utama adalah memprioritaskan varietas NK212 dengan dosis pupuk organik 200 g/tanaman (O2), karena kombinasi ini memberikan hasil optimal dengan efisiensi biaya. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pertanian berkelanjutan yang mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia (Uddin et al., 2025). Secara teoretis, penelitian ini memperkaya pemahaman tentang interaksi kompleks antara genotipe dan lingkungan. Studi lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi mekanisme fisiologis yang mendasari respons varietas seperti NK212 terhadap dosis pupuk organik, seperti efisiensi penyerapan hara atau aktivitas mikoriza arbuskular (Guidinelle et al., 2024).

Penelitian ini menunjukkan bahwa varietas NK212 dan dosis pupuk organik 200–300 g/tanaman merupakan kombinasi optimal untuk meningkatkan produksi jagung di lahan kering masam. Temuan ini memberikan rekomendasi teknologi budidaya yang spesifik lokasi dan ramah lingkungan, sejalan dengan prinsip pertanian berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menemukan bahwa varietas jagung dan dosis pupuk organik secara signifikan memengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman di lahan kering masam, meskipun interaksi keduanya tidak selalu signifikan. Varietas NK212 dan Jakarin menunjukkan performa terbaik dalam parameter jumlah daun, panjang tongkol, dan produksi total. Dosis pupuk organik 300 g/tanaman (O3) memberikan respons optimal pada sebagian besar parameter, tetapi kombinasi varietas NK212 dengan dosis 200 g/tanaman (O2) menghasilkan efisiensi ekonomi tertinggi (13,68 ton/ha). Berdasarkan analisis ragam (ANOVA), varietas berpengaruh sangat signifikan terhadap jumlah daun ($P = 0,0072$) dan panjang tongkol ($P = 0,0001$), sementara dosis pupuk organik signifikan pada diameter batang ($P = 0,0230$) dan bobot 100 butir ($P = 0,0250$).

Temuan penelitian ini memperkaya literatur tentang adaptasi varietas jagung di lahan marginal dengan pH rendah dan toksisitas Al^{3+} . Studi ini memberikan bukti empiris bahwa varietas hibrida seperti NK212 memiliki mekanisme fisiologis superior untuk memaksimalkan distribusi biomassa ke biji, sejalan dengan penelitian Guidinelle et al. (2024). Kontribusi praktisnya adalah strategi budidaya terpadu yang menggabungkan pemilihan varietas, pengelolaan hara, dan konservasi tanah, mendukung prinsip pertanian berkelanjutan sesuai rekomendasi Dong et al. (2022).

Hasil penelitian ini memiliki implikasi langsung bagi petani, kebijakan, dan industri pertanian. Bagi petani, penggunaan varietas NK212 atau Jakarin dengan dosis pupuk organik 200–300 g/tanaman dapat meningkatkan produktivitas hingga 14,10 ton/ha tanpa ketergantungan pada pupuk kimia. Pendekatan ini juga memperbaiki struktur tanah dan retensi air, mendukung ketahanan pangan di wilayah marginal. Bagi kebijakan, perlu pengembangan program pendampingan teknis (extension) untuk mempromosikan praktik budidaya ramah lingkungan, khususnya di Kabupaten Boalemo dan wilayah serupa. Bagi Industri, potensi pemanfaatan limbah pertanian sebagai pupuk organik dapat dikembangkan melalui kemitraan antara petani, pabrik pupuk, dan pemerintah daerah, mendukung ekonomi sirkular.

Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi antara pemilihan varietas unggul dan pengelolaan hara berkelanjutan untuk mengatasi tantangan produksi di lahan kering masam. Dengan mengadopsi rekomendasi ini, petani dapat meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan ekosistem pertanian. Meski terdapat keterbatasan, temuan ini membuka peluang baru untuk penelitian lebih lanjut yang berfokus pada inovasi teknologi dan kebijakan yang mendukung ketahanan pangan di wilayah marginal.

REFERENCES

- Ahmed, O. H., Ali, M., Abdullah, R., Chowdhury, A. J. K., Salleh, N. T., & Musah, A. A. (2022). Co-application of triple super phosphate and chicken litter biochar improves phosphorus availability of mineral tropical acid soils to reduce water pollution. *Desalination and Water Treatment*, 264, 40–53. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28706>
- Dong, L., Zhang, W., Xiong, Y., Zou, J., Huang, Q., Xu, X., Ren, P., & Huang, G. (2022). Impact of short-term organic amendments incorporation on soil structure and hydrology in semiarid agricultural lands. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.10.003>
- Ejigu, W., G.Selassie, Y., Elias, E., & Damte, M. (2021). Integrated fertilizer application improves soil properties and maize (*Zea mays* L.) yield on Nitisols in Northwestern Ethiopia. *Heliyon*, 7(2), e06074. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06074>
- Gezahegn, A., Selassie, Y. G., Agegnehu, G., Addisu, S., Mihretie, F. A., Kohira, Y., Lewoyehu, M., & Sato, S. (2025a). Synergistic effects of aquatic weed biochar and inorganic fertilizer on soil properties, maize yield, and nitrogen use efficiency on Nitisols of Northwestern Ethiopian Highlands. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101939. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101939>
- Guidinelle, R. B., Burak, D. L., Rangel, O. J. P., Peçanha, A. L., Passos, R. R., Rocha, L. O. da, Olivares, F. L., & Mendonça, E. de S. (2024). Impact of historical soil management on the interaction of plant-growth-promoting bacteria with maize (*Zea mays* L.). *Heliyon*, 10(7), e28754. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28754>
- Nyirenda, H., & Balaka, V. (2021). Conservation agriculture-related practices contribute to maize (*Zea mays* L.) yield and soil improvement in Central Malawi. *Heliyon*, 7(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06636>
- Orebo, D., Shanka, D., & Hadaro, M. (2021). Maize (*Zea mays* L.) yield response to the effect of blended fertilizer and varieties under supplemental irrigation at Hadaro Zuria Kebele, southern Ethiopia. *Heliyon*, 7(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07697>
- Schwalb, S. A., Hemkemeyer, M., Christensen, B. T., Heinze, S., Oliva, R. L., Joergensen, R. G., & Wichern, F. (2024). Disentangling the effects of mineral fertiliser N, P and K on microbial biomass, necromass and ionome in soil from the Askov long-term field experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109449>

- Sittadewi, E. H., Tejakusuma, I. G., Mulyono, A., Handayani, T., Tohari, A., & Zakaria, Z. (2024). Post-landslide restoration through multistrata agroforestry-based land management in the West Bogor area of Indonesia. *Trees, Forests and People*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100593>
- van den Broek, S., Nybom, I., Hartmann, M., Doetterl, S., & Garland, G. (2024). Opportunities and challenges of using human excreta-derived fertilizers in agriculture: A review of suitability, environmental impact and societal acceptance. *Science of the Total Environment*, 957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177306>
- Wakwoya, M. B., Woldeyohannis, W. H., & Yimamu, F. K. (2022). Effects of minimum tillage and liming on maize (*Zea mays* L.) yield components and selected properties of acid soils in Assosa Zone, West Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100301>
- Yimer, T., Abera, G., Beyene, S., & Rasche, F. (2024). Optimizing fertilization schemes to narrow the maize yield gap in smallholder farming systems in southern Ethiopia. *Heliyon*, 10(13), e33926. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33926>
- Uddin, K., Saha, B. K., Wong, V. N. L., & Patti, A. F. (2025). Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: A comprehensive review. *European Journal of Agronomy*, 162, 127433. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127433>