

Growth and Yield Response of Rice (*Oryza sativa* L.) to Compound Copper and Zinc Micronutrient Fertilization

Sutan Tarmizi Lubis^{1*}, Eka Tarwaca Susila Putra², Betha Silmia³

¹Program Studi Pengelolaan Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta, Indonesia;

²Departemen Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia;

³Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo, Madura, Indonesia;

Article History

Received : December 25th, 2025

Revised : January 09th, 2026

Accepted : January 16th, 2026

*Corresponding Author: **Sutan Tarmizi Lubis**, Program Studi Pengelolaan Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta, Indonesia;
Email: stn@polteklpp.ac.id

Abstract: This study evaluated a Zn–Cu compound micronutrient fertilizer on plant growth, yield components, grain yield, and fertilizer-use efficiency of Inpari 32 rice. A field experiment was conducted in an Inceptisol paddy field (1,100 m²) in Margokaton, Seyegan, Sleman, Yogyakarta, Indonesia (January–April 2025). Treatments were arranged in a non-factorial completely randomized design with eight fertilizer regimes and four replications, combining NPK with graded rates of Zn+Cu fertilizer. Pre- and post-planting soil nutrient analyses and post-harvest leaf tissue nutrient analyses were conducted, and vegetative traits, yield, Relative Agronomic Effectiveness (RAE), and fertilizer-use efficiency were evaluated. Soil Zn and Cu were initially very high and high, respectively, but remained below toxicity thresholds. Compared with regimes without Zn+Cu, Zn+Cu additions significantly increased plant height, tiller number, and milled dry grain yield. Treatments P2–P7 achieved RAE >100%, indicating greater agronomic effectiveness than the non-Zn+Cu regimes. The most effective dosage was P6 (1 dosage NPK + 1.5 dosage Zn+Cu).

Keywords: Copper, micronutrient fertilizer, relative agronomic effectiveness, rice (*Oryza sativa* L.), zinc

Pendahuluan

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan komoditas pangan strategis yang berperan penting dalam ketahanan pangan global, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021). Variabilitas iklim, terutama perubahan curah hujan, berpotensi memengaruhi stabilitas produktivitas padi sehingga strategi peningkatan hasil perlu mempertimbangkan risiko agroklimat (Aditya *et al.*, 2021). Selain itu, kondisi tergenang dan kejadian banjir pada agroekosistem sawah dapat memengaruhi proses fisiologi tanaman dan ketersediaan hara sehingga perlu diantisipasi dalam strategi budidaya (Panda & Barik, 2021).

Peningkatan produktivitas padi secara berkelanjutan menuntut pengelolaan hara yang seimbang, tidak hanya berfokus pada unsur hara makro, tetapi juga mencakup unsur hara mikro yang berperan penting dalam proses fisiologis tanaman dan efisiensi pemanfaatan pupuk (Alloway, 2022; Dhaliwal *et al.*, 2023; Shukla *et*

al., 2022).

Seng (Zn) dan tembaga (Cu) merupakan unsur hara mikro esensial yang berperan dalam aktivitas enzim, sintesis protein, fotosintesis, serta mekanisme antioksidan. Karena itu, respons tanaman terhadap pemupukan mikro sangat dipengaruhi oleh status hara awal tanah, pH, dan interaksi antarmikronutrien (Kabata-Pendias, 2021; Kumar *et al.*, 2021; Noulas *et al.*, 2018; Bana *et al.*, 2021). Defisiensi Zn pada lahan sawah masih dilaporkan di berbagai wilayah Asia dan dapat menurunkan efisiensi pemupukan serta hasil (Guo *et al.*, 2016; Noulas *et al.*, 2018). Berbagai studi menunjukkan aplikasi Zn, termasuk pemupukan daun, mampu meningkatkan pertumbuhan, hasil, dan kandungan Zn pada beras (Akram *et al.*, 2019; Cakmak *et al.*, 2020; Hamam *et al.*, 2017; Peramaiyan *et al.*, 2022).

Beberapa laporan juga menunjukkan aplikasi Zn melalui daun dapat menurunkan akumulasi Cd pada gabah melalui pengaturan sistem antioksidan dan translokasi logam (Zhen *et al.*, 2021). Inovasi formulasi pupuk seperti Zn-

coated urea juga dilaporkan dapat meningkatkan efisiensi N sekaligus mendorong biofortifikasi Zn pada padi, namun responsnya tetap bergantung pada kondisi tanah dan lingkungan (Abdullah *et al.*, 2022; Bana *et al.*, 2021). Di sisi lain, Cu diperlukan untuk fungsi fisiologis tanaman, tetapi dapat menjadi toksik jika akumulasi berlebih, khususnya pada tanah masam atau kondisi tertentu yang meningkatkan kelarutan logam (Kabata-Pendias, 2021; Rob *et al.*, 2024).

Integrasi pemupukan Zn + Cu berpotensi meningkatkan efisiensi pemupukan pada sistem sawah, namun efektivitasnya sangat ditentukan oleh kondisi spesifik lokasi serta kemungkinan interaksi antagonistik atau sinergistik antarmikronutrien (Bana *et al.*, 2021; Shukla *et al.*, 2022). Selain itu, Zn dapat memodifikasi proses biogeokimia tanah, termasuk transformasi N melalui perubahan komunitas mikroba, yang berpotensi memengaruhi respons tanaman terhadap NPK (Lv *et al.*, 2022). Keragaman status Zn–Cu pada tanah sawah tropika masam di Indonesia juga dilaporkan tinggi, sehingga pengujian lokasi diperlukan untuk menyusun rekomendasi yang presisi dan berkelanjutan (Nahumarury *et al.*, 2025; Supriatin & Salam, 2024; Susanti *et al.*, 2024).

Evaluasi efektivitas pupuk tidak hanya didasarkan pada peningkatan hasil, tetapi juga pada efisiensi agronomisnya. *Relative Agronomic Effectiveness* (RAE) digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk membandingkan kinerja perlakuan pemupukan terhadap perlakuan standar dalam kondisi lapangan (Baligar *et al.*, 2021). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh pupuk mikro majemuk Zn + Cu terhadap status Zn dan Cu pada tanah dan jaringan daun, pertumbuhan vegetatif, serta hasil gabah padi, kemudian menilai efektivitas agronomis perlakuan melalui RAE sebagai dasar perumusan implikasi rekomendasi pemupukan.

Bahan dan Metode

Lokasi dan bahan

Percobaan lapang dilaksanakan pada lahan sawah di Desa Margokaton, Kecamatan Seyegan, Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta, Indonesia pada Januari–April 2025. Tanaman uji adalah padi (*Oryza sativa* L.) varietas Inpari 32 (varietas unggul yang telah dilepas resmi dan umum dibudidayakan). Lahan percobaan merupakan tanah Inceptisol.

Rancangan percobaan dan perlakuan

Percobaan disusun menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) faktor tunggal dengan empat blok sebagai ulangan, sehingga terdapat 8 perlakuan $\times$ 4 ulangan = 32 satuan percobaan. RAKL dipilih untuk mengendalikan keragaman lingkungan lapang antarblok (Montgomery, 2017). Perlakuan berupa delapan taraf pemupukan (P0–P7) yang merupakan kombinasi pemupukan makro (NPK) dan pupuk mikro majemuk Zn+Cu (rincian komposisi/dosis setiap taraf disajikan pada Tabel Perlakuan). Ukuran plot perlakuan adalah 5 m $\times$ 5 m (25 m²).

Aplikasi pupuk

Pupuk mikro majemuk Zn+Cu diaplikasikan secara semprot daun (foliar) pada umur 14, 24, 34, dan 44 hari setelah tanam (HST). Dosis aplikasi foliar dinyatakan konsisten per satuan percobaan, yaitu 7,5 g pupuk per plot (25 m²) per aplikasi, yang dilarutkan dalam 5 L air per plot (setara 7,5 g/5 L per plot). Pemupukan makro diberikan tiga kali pada 15, 30, dan 45 HST menggunakan pupuk urea, ZA, SP-36, dan KCl dengan dosis total musim tanam masing-masing 100; 100; 50; dan 50 kg ha⁻¹. Pembagian dosis per waktu aplikasi mengikuti rancangan perlakuan dan praktik pemupukan lapang yang diterapkan pada percobaan.

Tabel 1. Kode Perlakuan dan Dosis Pemupukan

Kode	Perlakuan	Cu dan Zn	Urea	ZA	SP-36	KCl
P0	Kontrol	0	0	0	0	0
P1	1 Dosis NPK	0	1	1	1	1
P2	1 Dosis NPK + 0,5 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	0,5	1	1	1	1
P3	$\frac{3}{4}$ Dosis NPK + 0,5 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	0,5	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
P4	1 Dosis NPK + 1 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1	1	1	1	1
P5	$\frac{3}{4}$ Dosis NPK + 1 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
P6	1 Dosis NPK + 1,5 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1,5	1	1	1	1
P7	$\frac{3}{4}$ Dosis NPK + 1,5 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1,5	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$

Pengambilan sampel, analisis laboratorium, dan variabel pengamatan

Analisis pH tanah serta kadar Zn dan Cu tersedia dilakukan pada sampel tanah pra-tanam dan pascaplikasi perlakuan mengacu pada Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk (Eviati *et al.*, 2023). Zn dan Cu tersedia diekstraksi menggunakan larutan DTPA, sedangkan pH diukur pada suspensi tanah–air. Kadar Zn dan Cu ditentukan menggunakan spektrofotometri serapan atom (AAS) atau instrumen ekuivalen sesuai fasilitas laboratorium (Eviati *et al.*, 2023). Variabel pengamatan dikelompokkan menjadi: (1) **pertumbuhan** (tinggi tanaman dan jumlah anakan) yang diamati berkala pada rumpun contoh di setiap plot; (2) **komponen hasil dan hasil saat panen**. Hasil diukur menggunakan petak panen (ubinan) 5 m² yang ditempatkan di bagian tengah plot untuk meminimalkan pengaruh tepi, kemudian dikonversi menjadi hasil per hektar.

Analisis statistik dan perhitungan efektivitas (RAE)

Seluruh data dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) sesuai rancangan RAKL. Jika terdapat perbedaan nyata, dilanjutkan dengan uji perbandingan rerata Tukey HSD pada taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ (Montgomery, 2017). Pengolahan data dilakukan menggunakan SAS. Efektivitas pupuk secara agronomis dinilai menggunakan Relative Agronomic Effectiveness (RAE) (Baligar *et al.*, 2021) dengan rumus:

$$RAE = \frac{\text{Hasil pupuk yang diuji} - \text{Kontrol}}{\text{Hasil pupuk standar} - \text{Kontrol}} \times 100\%$$

RAE digunakan untuk membandingkan kinerja agronomis perlakuan pupuk uji terhadap standar pada kondisi lapang (Baligar *et al.*, 2021). Hubungan respons (hasil/RAE) terhadap dosis pupuk mikro majemuk dapat dianalisis menggunakan regresi untuk mengidentifikasi dosis paling efektif

Hasil dan Pembahasan

Zn dan Cu Tersedia serta pH Tanah Awal

Sebelum perlakuan pemupukan diterapkan, dilakukan pengambilan sampel tanah untuk menentukan status awal Zn dan Cu tersedia serta pH tanah pada lokasi penelitian. Informasi ini diperlukan sebagai dasar interpretasi respons

tanaman terhadap perlakuan, mengingat efektivitas pemupukan mikro sangat dipengaruhi oleh tingkat ketersediaan hara awal dan kondisi pH tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa tanah memiliki Zn tersedia 41,37 mg/kg, Cu tersedia 3,65 mg/kg, dan pH 5,63.

Nilai Zn tersedia yang tinggi pada pH agak masam (pH 5,63) mengindikasikan bahwa kondisi awal tanah tidak mengarah pada defisiensi Zn. Ketersediaan Zn pada tanah sawah sangat dipengaruhi oleh pH, bahan organik, tekstur, serta dinamika redoks pada kondisi tergenang, sehingga respons perlakuan lebih tepat ditafsirkan sebagai perubahan efisiensi pemanfaatan Zn dalam sistem tanah–tanaman, bukan semata-mata koreksi kekurangan hara (Alloway, 2022; Kabata-Pendias, 2021).

Nilai Cu tersedia sebesar 3,65 mg/kg juga menunjukkan status Cu awal yang relatif tinggi. Cu merupakan unsur esensial bagi aktivitas enzim dan metabolisme tanaman, tetapi memiliki rentang kecukupan yang sempit sehingga peningkatan Cu akibat pemupukan perlu dievaluasi dengan hati-hati untuk mencegah akumulasi dan potensi efek toksik pada tanaman maupun lingkungan (Kabata-Pendias, 2021; Kumar *et al.*, 2021).

Zn dan Cu Tersedia Tanah Setelah Aplikasi Perlakuan

Setelah seluruh perlakuan pemupukan diaplikasikan, dilakukan analisis ulang tanah untuk mengevaluasi perubahan Zn dan Cu tersedia sebagai indikator dinamika ketersediaan hara mikro akibat perlakuan. Hasil analisis (Tabel.2) menunjukkan bahwa Zn tersedia tanah berada pada kisaran 46,14–52,83 mg/kg dan tidak berbeda nyata antarperlakuan berdasarkan uji Tukey-HSD 5%. Tidak ditemukannya perbedaan nyata ini konsisten dengan status awal tanah yang telah tergolong sangat tinggi, sehingga penambahan Zn melalui perlakuan cenderung tidak meningkatkan fraksi “tersedia” secara terukur maupun berbeda secara statistik.

Secara kimia tanah, Zn pada lahan sawah dapat mengalami penyanggaan (*buffering*) melalui adsorpsi pada liat serta oksida Fe/Mn dan pembentukan ikatan kompleks dengan bahan organik, sehingga tambahan input tidak selalu tampak sebagai kenaikan Zn-tersedia, terutama ketika cadangan awal sudah tinggi (Alloway, 2022). Selain itu, karena pupuk mikro diaplikasikan secara foliar, kontribusi langsung ke pool Zn tanah dapat relatif kecil dan lebih dipengaruhi oleh residu semprotan yang jatuh ke

permukaan tanah.

Tabel 2. Kandungan Zn dan Cu tersedia tanah setelah aplikasi perlakuan

Kode Perlakuan	Zn Tersedia (mg/kg)	Cu Tersedia (mg/kg)
P0	48,77 a	4,42 d
P1	47,72 a	6,77 cd
P2	47,95 a	8,70 bc
P3	46,14 a	11,10 b
P4	51,78 a	11,16 b
P5	49,18 a	12,29 ab
P6	50,17 a	12,53 ab
P7	52,83 a	15,39 a

Keterangan: nilai yang diikuti huruf yang sama mengindikasikan perbedaan tidak signifikan berdasarkan Tukey-HSD pada taraf 5%.

Berbeda dengan Zn, Cu tersedia tanah menunjukkan peningkatan dan perbedaan nyata antarperlakuan, dengan kisaran 4,42–15,39 mg/kg. Perlakuan P7 (15,39 mg/kg) merupakan yang tertinggi dan berbeda nyata dibanding kelompok perlakuan berkadar Cu lebih rendah (P0–P4). Pola ini mengindikasikan bahwa penambahan pupuk mikro majemuk yang mengandung Cu lebih mampu meningkatkan Cu pada fraksi tersedia, baik karena adanya tambahan input Cu maupun karena dinamika Cu yang relatif lebih persisten dalam tanah dibanding Zn. Namun, interpretasi kenaikan Cu tersedia perlu dilakukan secara hati-hati karena Cu memiliki karakter yang mudah terakumulasi serta rentang yang relatif sempit antara cukup dan berlebih; kenaikan Cu tersedia pascaperlakuan dapat merefleksikan residu aplikasi dan berpotensi menjadi isu bila pemupukan diulang terus-menerus tanpa pemantauan (Kabata-Pendias, 2021)..

Zn dan Cu Total Jaringan Daun Setelah Aplikasi Perlakuan

Analisis jaringan daun dilakukan untuk menggambarkan status hara mikro dalam tanaman setelah perlakuan, khususnya Zn total dan Cu total sebagai indikator serapan serta regulasi hara pada tingkat tanaman. Berdasarkan Tabel 3, kadar Zn total daun berada pada kisaran 25,87–44,63 mg/kg, sedangkan Cu total daun berkisar 3,24–5,78 mg/kg. Secara umum, kisaran Zn total yang diperoleh masih berada dalam rentang kecukupan jaringan padi (± 25 –100 mg/kg), dan gejala defisiensi umumnya muncul ketika kadar Zn turun di bawah 20 mg/kg (Bana *et al.*, 2021). Dengan demikian, temuan ini menegaskan bahwa tanaman pada seluruh

perlakuan tidak menunjukkan indikasi defisiensi Zn berdasarkan indikator jaringan.

Uji lanjut menunjukkan bahwa perlakuan P1 (NPK saja) menghasilkan Zn total daun tertinggi (44,63 mg/kg) dan berbeda nyata terhadap P2, P4, dan P7. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Zn daun tidak selalu mengikuti penambahan pupuk mikro majemuk. Salah satu penjelasan yang relevan adalah bahwa pada kondisi tanah dengan Zn tersedia sangat tinggi, tanaman cenderung mempertahankan konsentrasi Zn jaringan melalui mekanisme homeostasis, sehingga respons konsentrasi menjadi tidak linier. Selain itu, konsentrasi hara jaringan dapat dipengaruhi oleh efek pengenceran (*dilution effect*), yaitu ketika pertumbuhan biomassa meningkat, konsentrasi hara (mg/kg) dapat menurun walaupun total serapan meningkat. Karena itu, interpretasi konsentrasi Zn daun perlu dibaca bersamaan dengan respons pertumbuhan dan hasil agar tidak menghasilkan kesimpulan yang keliru.

Tabel 3. Kandungan Zn dan Cu total jaringan daun setelah aplikasi perlakuan

Kode Perlakuan	Zn total (mg/kg)	Cu total (mg/kg)
P0	34,49 ab	3,27 b
P1	44,63 a	4,41 ab
P2	25,87 b	4,23 ab
P3	33,34 ab	5,08 ab
P4	31,46 b	5,78 a
P5	35,85 ab	4,66 ab
P6	33,26 ab	4,56 ab
P7	28,57 b	3,24 b

Keterangan: nilai yang diikuti huruf yang sama mengindikasikan perbedaan tidak signifikan berdasarkan Tukey-HSD pada taraf 5%.

Cu total daun, perlakuan P4 menunjukkan nilai tertinggi (5,78 mg/kg) dan berbeda nyata dibanding perlakuan P0 dan P7. Respons Cu yang tidak konsisten linier terhadap kenaikan dosis mengindikasikan bahwa Cu diatur ketat oleh tanaman; pada kondisi suplai yang meningkat, tanaman dapat membatasi pengambilan atau translokasi Cu untuk mencegah risiko stres oksidatif. Temuan bahwa P7 tidak menunjukkan Cu daun tinggi meskipun Cu tanah pascaperlakuan meningkat memperkuat dugaan bahwa mekanisme regulasi internal tanaman dan/atau perbedaan efisiensi pemanfaatan hara lebih menentukan daripada sekadar ketersediaan Cu tanah.

Pengaruh Perlakuan terhadap Pertumbuhan Vegetatif Tanaman

Perlakuan penambahan pupuk mikro majemuk Zn + Cu pada tanaman padi memiliki pengaruh terhadap tinggi tanaman. Pada pembahasan ini, tinggi tanaman akan difokuskan pada saat 10 MSA atau 10 minggu setelah aplikasi pupuk. Pada 10 MSA, terlihat bahwa perlakuan P1 hingga P7 memberikan pengaruh signifikan dibanding perlakuan P0 atau kontrol

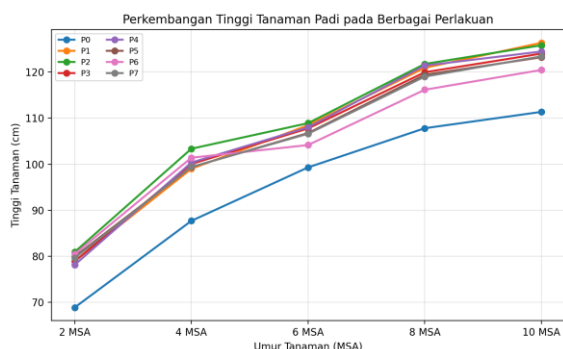
tanpa penambahan pupuk baik NPK atau mikro majemuk Zn + Cu.

Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa secara umum penambahan pupuk mikro majemuk Zn + Cu sebanyak 0,5 hingga 1,5 dosis rekomendasi berpengaruh signifikan ketika diimbangi dengan aplikasi NPK sebanyak 0,75 hingga 1 dosis rekomendasi umum. Meski demikian, tinggi tanaman padi Inpari 32 secara statistik untuk semua perlakuan sudah melebihi deskripsi varietas yang berada di angka 97 cm.

Tabel 3. Pengaruh perlakuan terhadap rerata tinggi tanaman padi

Kode Perlakuan	Rerata Tinggi Tanaman (cm)				
	2 MSA	4 MSA	6 MSA	8 MSA	10 MSA
P0	68,90 b	87,70 b	99,30 b	107,80 b	111,35 b
P1	78,95 a	99,00 a	108,45 a	120,90 a	126,35 a
P2	80,95 a	103,35 a	108,90 a	121,75 a	125,80 a
P3	78,90 a	100,05 a	107,75 a	119,95 a	124,00 a
P4	78,15 a	100,35 a	108,00 a	121,40 a	124,45 a
P5	79,95 a	99,35 a	106,75 a	119,40 a	123,20 a
P6	80,50 a	101,40 a	104,15 ab	116,15 a	120,45 a
P7	79,65 a	99,40 a	106,60 a	119,00 a	123,40 a

Keterangan: nilai yang diikuti huruf yang sama mengindikasikan perbedaan tidak signifikan berdasarkan Tukey-HSD pada taraf 5%.



Gambar 1. Perkembangan tinggi tanaman padi pada berbagai perlakuan

Jumlah anakan akan difokuskan pada saat 8 MSA (minggu setelah aplikasi) pupuk. Pada 8 MSA, perlakuan dengan kode P1 (1 dosis NPK), P2 (1 dosis NPK + 0,5 dosis mikro majemuk Zn + Cu), P4 (1 dosis NPK + 1 dosis mikro majemuk Zn + Cu), P6 (1 dosis NPK + 1,5 dosis mikro majemuk Zn + Cu), dan P7 (0,75 dosis NPK + 1,5 dosis mikro majemuk Zn + Cu) memberikan pengaruh paling signifikan dibanding perlakuan lain. Berdasarkan hasil jumlah anakan tanaman padi, secara umum penambahan pupuk mikro majemuk Zn + Cu sebanyak 0 hingga 1 dosis rekomendasi berpengaruh signifikan ketika diimbangi dengan aplikasi NPK sebanyak 0,75 hingga 1 dosis rekomendasi umum.

Tabel 4. Pengaruh perlakuan terhadap jumlah anakan padi

Perlakuan	Jumlah Anakan	
	6 MSA	8 MSA
P0	13,45 b	15,85 b
P1	18,00 a	20,60 a
P2	18,50 a	21,65 a
P3	15,10 ab	17,90 ab
P4	16,55 ab	20,05 a
P5	17,05 ab	19,50 ab
P6	18,10 a	21,35 a
P7	17,00 ab	20,40 a

Keterangan: nilai yang diikuti huruf yang sama mengindikasikan perbedaan tidak signifikan berdasarkan Tukey-HSD pada taraf 5%.

Pengaruh Perlakuan terhadap Produksi Tanaman

Perlakuan yang diberikan kepada tanaman padi memiliki pengaruh terhadap produksi padi yang dihasilkan. Pada panen yang dihasilkan, terlihat bahwa perlakuan dengan kode P6 memberikan pengaruh paling signifikan dibanding perlakuan lain. Berdasarkan hasil perhitungan panen, secara umum diketahui bahwa penambahan pupuk mikro majemuk Zn + Cu sebanyak 1,5 dosis ketika diimbangi dengan aplikasi NPK sebanyak 1 dosis rekomendasi umum dapat meningkatkan hasil panen padi. Mengacu pada deskripsi varietas, padi Inpari 32

memiliki rerata hasil di angka 6,30 ton/ha gabah kering giling (GKG) dan potensi hasil di angka 8,42 ton/ha GKG sehingga secara umum dapat dikatakan bahwa perlakuan P3-P7 sudah melebihi rerata hasil. Sementara potensi produksi belum dapat dicapai oleh semua perlakuan.

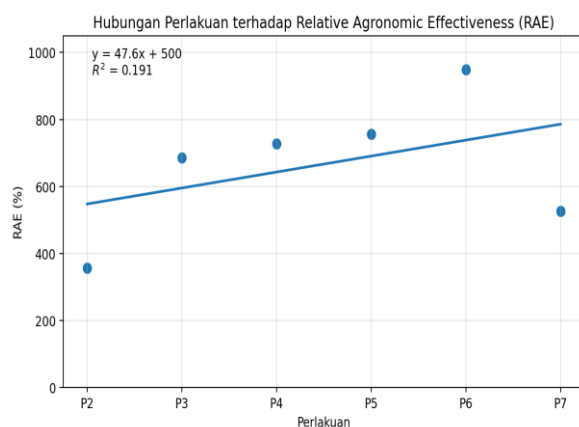
Tabel 5. Pengaruh perlakuan terhadap produksi padi

Perlakuan	Panen GKG (ton/ha)
P0	4,44 c
P1	4,83 c
P2	5,82 bc
P3	7,09 ab
P4	7,25 ab
P5	7,36 ab
P6	8,09 a
P7	6,47 abc

Keterangan: nilai yang diikuti huruf yang sama mengindikasikan perbedaan tidak signifikan berdasarkan Tukey-HSD pada taraf 5%.

Efektivitas Pupuk mikro majemuk Zn + Cu berdasar RAE

Nilai *Relative Agronomic Effectiveness* (RAE) digunakan untuk membandingkan efektivitas agronomis perlakuan pupuk terhadap perlakuan standar; nilai 100% merepresentasikan efektivitas setara standar, sedangkan nilai >100% menunjukkan peningkatan respons relatif terhadap standar (Baligar *et al.*, 2021). Namun, nilai RAE yang sangat tinggi perlu dikritisi secara metodologis karena sensitif terhadap besarnya selisih hasil pada perlakuan pembandingan dan variabilitas data; interpretasi efektivitas sebaiknya tetap dipadukan dengan signifikansi statistik, ukuran efek, dan konteks status hara awal tanah (Baligar *et al.*, 2021).



Gambar 2. Nilai RAE perlakuan penambahan pupuk mikro majemuk Zn + Cu

Berdasarkan grafik yang diperoleh, terdapat tren kenaikan nilai RAE dari P2 hingga

P6 lalu turun pada P7. Perlakuan P6 memiliki RAE paling tinggi (~950%) yang menunjukkan efektivitas paling tinggi. Sementara itu, P2 memiliki RAE paling rendah (~356%) yang menunjukkan efektivitas paling rendah pula. Meski demikian, dengan pengertian bahwa perlakuan pupuk dinilai efektif jika RAE >100% maka dapat dikatakan bahwa perlakuan P2 hingga P7 dengan RAE di rentang 356-950% berarti bahwa aplikasi pupuk mikro majemuk Zn + Cu lebih efektif secara agronomis dibanding perlakuan tanpa mikro majemuk Zn + Cu.

Pembahasan

Status awal tanah menunjukkan Zn tersedia 41,37 mg kg⁻¹, Cu tersedia 3,65 mg kg⁻¹, dan pH 5,63, sehingga lokasi penelitian tidak tepat dibingkai sebagai lahan defisiensi Zn-Cu. Pada pH agak masam, kelarutan dan aktivitas hara mikro serta proses jerapan-pelepasan pada koloid tanah, termasuk dinamika redoks pada sistem sawah tergenang, dapat memengaruhi fraksi tersedia dan serapan tanaman. Karena itu, respons perlakuan lebih relevan ditafsirkan sebagai efek tambahan dan kebutuhan dosis optimum pupuk mikro majemuk pada tanah non-defisien, bukan semata-mata koreksi defisiensi (Alloway, 2022; Kabata-Pendias, 2021).

Setelah aplikasi perlakuan, Zn tersedia tanah tidak berbeda nyata pada seluruh perlakuan, sedangkan Cu tersedia meningkat nyata dan tertinggi pada dosis tinggi. Kondisi Zn yang tidak berubah nyata konsisten dengan mekanisme penyanggaan tanah: pada tanah dengan Zn awal tinggi, tambahan input Zn cenderung cepat terjerap pada liat/oksida Fe-Mn atau terkompleks bahan organik sehingga perubahan fraksi “tersedia” yang terukur menjadi kecil pada skala waktu percobaan (Alloway, 2022). Sebaliknya, Cu lebih mudah menunjukkan perubahan pada indikator tanah dan cenderung persisten; kenaikan Cu tersedia pascaperlakuan perlu ditafsirkan hati-hati karena Cu memiliki rentang sempit antara kecukupan dan potensi toksisitas bila terjadi akumulasi (Kabata-Pendias, 2021; Kumar *et al.*, 2021).

Kadar Zn total jaringan daun pascaplikasi perlakuan berada pada kisaran 14,25–17,85 mg kg⁻¹ dan termasuk rendah untuk tanaman padi, karena beberapa referensi menyebutkan bahwa konsentrasi Zn pada jaringan vegetatif yang memadai umumnya berada di atas kisaran kritis sekitar 20–25 mg kg⁻¹ tergantung fase pertumbuhan dan bagian tanaman (Bana *et al.*, 2021). Rendahnya kadar Zn daun ini meskipun Zn tersedia tanah tinggi dapat mengindikasikan

keterbatasan serapan/transport Zn pada kondisi tertentu (misalnya interaksi dengan P tinggi, kompetisi kation, atau hambatan fisiologis), sehingga respons pemupukan mikro pada penelitian ini lebih merefleksikan efisiensi pemanfaatan Zn daripada sekadar penambahan stok Zn tanah (Alloway, 2022; Cakmak *et al.*, 2020).

Kadar Cu total jaringan daun setelah aplikasi perlakuan menunjukkan perbedaan yang lebih jelas dibanding Zn, sejalan dengan sifat Cu yang mudah berasosiasi dengan fraksi organik/oksida serta memiliki rentang kecukupan–toksisitas yang sempit. Cu berperan penting dalam aktivitas enzim oksidatif dan sistem pertahanan antioksidan, sehingga peningkatan Cu daun berpotensi mendukung metabolisme tanaman, tetapi peningkatan berlebih dapat menekan pertumbuhan (Kumar *et al.*, 2021). Temuan ini konsisten dengan laporan bahwa aplikasi Cu pada dosis tepat dapat meningkatkan atribut antioksidan dan hasil, namun responsnya sangat dipengaruhi dosis dan kondisi lingkungan (Cheng *et al.*, 2023; Hamam *et al.*, 2017).

Perbedaan yang lebih kuat muncul pada hasil panen, di mana perlakuan terbaik menghasilkan GKG tertinggi dan menunjukkan adanya dosis optimum. Pola meningkat pada dosis menengah–tinggi lalu menurun pada dosis tertentu konsisten dengan konsep keseimbangan hara: peningkatan mikro hanya efektif ketika dukungan makro memadai, sedangkan ketidakseimbangan (misalnya mikro tinggi tetapi NPK tidak optimum) dapat menurunkan efisiensi pengisian gabah dan membatasi potensi hasil (Cakmak *et al.*, 2020; Shukla *et al.*, 2022). Dengan Zn tanah awal yang sangat tinggi, peningkatan hasil lebih logis ditafsirkan sebagai peningkatan efisiensi proses fisiologis dan pengisian hasil, bukan sebagai pemulihan defisiensi.

Nilai RAE yang tinggi pada sebagian perlakuan menunjukkan adanya peningkatan respons hasil dibanding perlakuan standar, tetapi interpretasinya harus proporsional: RAE dapat melonjak ketika hasil perlakuan standar rendah atau varians data besar. Oleh karena itu, klaim efektivitas pupuk sebaiknya ditegaskan berdasarkan kombinasi uji beda nyata, konsistensi tren antar parameter (serapan hara, komponen hasil), serta diagnosis status hara awal tanah (Baligar *et al.*, 2021; Baligar *et al.*, 2021).

Implikasi hasil dapat dirumuskan secara terstruktur. Secara agronomis, dosis optimum mikro majemuk yang dipadukan dengan NPK

penuh berpotensi meningkatkan hasil, tetapi rekomendasi harus berbasis diagnosis status hara awal karena respons mikro sangat spesifik lokasi (Alloway, 2022; Shukla *et al.*, 2022). Secara ekologis, peningkatan Cu tersedia pada dosis tinggi mengindikasikan potensi akumulasi dan risiko jangka panjang sehingga pemupukan yang mengandung Cu perlu pemantauan residu dan kehati-hatian aplikasi berulang (Kabata-Pendias, 2021; Kumar *et al.*, 2021). Secara ekonomis, klaim “paling efektif” seharusnya ditutup dengan analisis biaya–manfaat (biaya produk + biaya aplikasi foliar vs nilai kenaikan hasil), karena efektivitas agronomis tidak selalu identik dengan efisiensi ekonomi (Baligar *et al.*, 2021).

Kesimpulan

Aplikasi pupuk mikro majemuk Zn + Cu berpengaruh signifikan terhadap pertambahan tinggi tanaman, jumlah anakan, dan hasil gabah kering giling pada budidaya padi varietas Inpari 32 yang dilakukan. Berdasarkan dari nilai RAE, aplikasi pupuk mikro majemuk Zn + Cu pada padi Inpari 32 dapat dikatakan efektif karena bernilai >100%. Dosis pupuk yang paling efektif yaitu P6 dengan 1 dosis NPK + 1,5 dosis mikro majemuk Zn + Cu.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih kepada PT Dyti Chemindo atas dukungan pendanaan dalam pelaksanaan penelitian ini.

Referensi

- Abdullah, A., Mustafa, A., Shahid, M. Q., Zaheer, M. S., Hassan, M. U., Ashraf, R., Siddiqui, M. H., Fahad, S., & Cheema, M. (2022). Zinc-coated urea improves the nitrogen use efficiency and grain yield of irrigated rice. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 926939. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.926939>
- Aditya, J. P., Koesmaryono, Y., & Kholiq, M. A. (2021). Pengaruh perubahan curah hujan terhadap produktivitas padi sawah di Kalimantan Barat. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(2), 237–246. <https://doi.org/10.14710/jil.19.2.237-246>

- Akram, M. A., Depar, N., & Irfan, M. (2019). Zinc application improves productivity and biofortification of mini core rice hybrids. *Pakistan Journal of Agriculture, Agricultural Engineering and Veterinary Sciences*, 35(2), 72–80. <https://pjaevs.sau.edu.pk/index.php/ojs/article/view/320>
- Alloway, B. J. (2022). Micronutrients in crop production: An update on soil–plant interactions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(2), 145158. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100345>
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2021). Nutrient use efficiency in plants: An overview. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(6), 637–650. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1869748>
- Bana, R. C., Gupta, A. K., Bana, R. S., Shivay, Y. S., Bamboriya, S. D., Thakur, N. P., ... & Choudhary, A. K. (2021). Zinc-coated urea for enhanced zinc biofortification, nitrogen use efficiency and yield of basmati rice under typical fluvents. *Sustainability*, 14(1), 104. <https://doi.org/10.3390/su14010167>
- Cakmak, I., White, P. J., & Marschner, H. (2020). Zinc in agriculture: Biofortification and productivity of cereal crops. *Plant and Soil*, 457(1), 3140. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04630-2>
- Cheng, Y., Niu, H., & Yu, Q. (2023). Copper application in rice changes paddy soil microbial communities and enhances enzyme activities and plant growth. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(6), 3061–3070. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10670-w>
- Dhaliwal, J. K., Prasad, R., Kaur, R., Kaur, J., Sharma, V., Gupta, J., Sharma, S., Etesami, H., & Singh, B. (2023). Impact of manures and fertilizers on yield, nutrient content in grain and soil properties under rice–wheat cropping system in semi-arid region. *PLOS ONE*, 18(11), e0292602. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292602>
- Eviati, Sulaeman, Purwakusuma, W., Hidayati, R., Pramono, A., & Yuniarti, A. (2023). *Petunjuk teknis edisi 3: Analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia. <https://bbsdlp.litbang.pertanian.go.id/buku/petunjuk-teknis-analisis-kimia-tanah-tanaman-air-dan-pupuk-edisi-3>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *World food and agriculture – statistical yearbook 2021*. FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb4477en>
- Guo, Z., Zhang, J., Li, X., et al. (2016). Effects of nitrogen rate and zinc management on zinc efficiency in rice production: A case study in China. *The Journal of Agricultural Science*, 154(4), 584–597. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000441>
- Hamam, K. A., et al. (2017). Pengaruh pupuk ZnSO₄ dan varietas padi terhadap pertumbuhan serta serapan Zn pada lahan sawah. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 43(3), 227–234. <https://doi.org/10.24831/jai.v43i3.11125>
- Kabata-Pendias, A. (2021). *Trace elements in soils and plants (5th ed.)*. CRC Press.
- Kumar, V., et al. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 262, 127810. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>
- Lv, H. H., Ji, C. C., Zhang, L., Jiang, C. C., & Cai, H. M. (2022). Zinc application promotes nitrogen transformation in rice rhizosphere soil by modifying microbial communities and gene expression levels. *Science of the Total Environment*, 849, 157858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157858>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments (9th ed.)*. Wiley.
- Nahumarury, E. M., et al. (2025). Evaluasi pemberian pupuk mikro majemuk seng dan tembaga terhadap pertumbuhan vegetatif dan produksi padi sawah (*Oryza sativa* L.). *Jurnal Ecosolum*, 14(2), 131–140. <https://doi.org/10.20956/ecosolum.v14i2.32407>
- Noulas, C., Tziouvalekas, M., & Karyotis, T. (2018). Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49, 252–260.

- 1
<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.06.001>
- Panda, D., & Barik, J. (2021). Flooding tolerance in rice: Focus on mechanisms and crop improvement. *Rice Science*, 28(1), 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2020.11.005>
- Peramaiyan, P., Craufurd, P., Kumar, V., Seelan, L. P., McDonald, A. J., Balwinder-Singh, Kishore, A., & Singh, S. (2022). Agronomic biofortification of zinc in rice for diminishing malnutrition in South Asia. *Sustainability*, 14(13), 7747. <https://doi.org/10.3390/su14137747>
- Rahman, N., & Schoenau, J. (2022). Zinc and copper interactions under variable soil phosphorus and moisture conditions in selected Saskatchewan soils. *Journal of Plant Nutrition*, 45(3), 311–331. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1952223>
- Rob, A. K., et al. (2024). Role of copper in rice (*Oryza sativa* L.) production: A review. *Journal of Plant Physiology*, 302, 154314. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154314>
- Shukla, A. K., Behera, S. K., Majumdar, K., & Rao, C. S. (2022). Micronutrient fertilization for improving crop productivity and quality in India. *Agronomy*, 12(3), 654. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030654>
- Supriatin, S., & Salam, A. K. (2024). Total and extractable micronutrients of tropical acid soils of Lampung, Indonesia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(19), 2529–2544. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2367250>
- Susanti, W. I., Cholidah, S. N., & Agus, F. (2024). Improving zinc and copper management to support sustainable rice cultivation in Indonesia. *Sustainability*, 16(2), 845. <https://doi.org/10.3390/su16020845>
- Zhen, S., Shuai, H., Xu, C., Lv, G., Zhu, X., Zhang, Q., Zhu, Q., Núñez-Delgado, A., Conde-Cid, M., Zhou, Y., & Huang, D. (2021). Foliar application of Zn reduces Cd accumulation in grains of late rice by regulating the antioxidant system, enhancing Cd chelation onto cell wall of leaves, and inhibiting Cd translocation in rice. *Science of the Total Environment*, 770, 145302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145302>