

Pengaruh Aplikasi Pupuk Mikro Zinc (Zn) dan Copper (Cu) terhadap Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman Tomat (*Solanum lycopersicum* L.)

*Effect of Zinc (Zn) and Copper (Cu) Micronutrient Application on Growth and Yield of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.)*

Sutan Tarmizi Lubis^{1*}, Eka Tarwaca Susila Putra², Lisa Kawispa Ananda³, Azhari Muklis⁴

¹Program Studi Pengelolaan Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

^{2,3,4}Departemen Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

^{*}Penulis untuk korespondensi E-mail: stn@polteklpp.ac.id

Diajukan: 15 Februari 2026 **Diterima:** 8 Mei 2026 **Dipublikasi:** 31 Mei 2026

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of a Zn–Cu compound micronutrient fertilizer on growth, yield components, productivity, and nutrient use efficiency of Servo tomato. The field experiment was conducted in Srigading Village, Sanden Subdistrict, Bantul Regency, Yogyakarta, Indonesia, from January to April 2025. Treatments were arranged in a single-factor Randomized Complete Block Design (RCBD) with eight fertilization levels and four replications, combining NPK fertilizer with graded doses of Zn+Cu micronutrient fertilizer. Soil nutrient analyses were conducted before and after planting, while leaf tissue nutrient analysis was performed prior to harvest. Observed parameters included vegetative growth, yield components, Relative Agronomic Effectiveness (RAE), and fertilizer-use efficiency. The results showed that the combination of micronutrient fertilizer and NPK significantly enhanced nutrient uptake and yield. The highest Cu uptake was obtained in treatment P7 ($\frac{3}{4}$ NPK dose + 1.5 micronutrient dose) at $0.08137 \text{ g ha}^{-1}$, while the highest Zn uptake was recorded in P4 (1 NPK dose + 1 micronutrient dose) at $0.24696 \text{ g ha}^{-1}$. Treatment P7 increased branch number up to three branches per plant and produced the highest yield of 39.50 t ha^{-1} . The RAE value exceeded 100%, indicating that the tested fertilizer was 209.38% as effective as the standard fertilization. These findings highlight that the synergy and balance between macro- and micronutrients play a more critical role in determining productivity than the high uptake of a single nutrient alone.

Keywords: nutrient use efficiency (NUE); plant productivity; tomato; Zn–Cu micronutrient fertilizer

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh pupuk majemuk mikro Zn–Cu terhadap pertumbuhan, komponen hasil, produktivitas, serta efisiensi penggunaan pupuk pada tomat varietas Servo. Percobaan lapangan dilaksanakan di Kelurahan Srigading, Kecamatan Sanden, Kabupaten Bantul, Yogyakarta, Indonesia, pada Januari–April 2025. Perlakuan disusun dalam Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) non-faktorial dengan delapan aras pemupukan dan empat ulangan, yang mengombinasikan pupuk NPK dengan berbagai dosis pupuk mikro Zn+Cu. Analisis unsur hara tanah dilakukan sebelum dan sesudah tanam, sedangkan analisis hara jaringan daun dilakukan sebelum panen. Parameter yang diamati meliputi pertumbuhan vegetatif, komponen hasil, *Relative Agronomic Effectiveness* (RAE), dan efisiensi penggunaan pupuk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pupuk mikro dan NPK berpengaruh terhadap peningkatan serapan hara serta hasil panen. Serapan Cu tertinggi diperoleh pada perlakuan P7 ($\frac{3}{4}$ dosis NPK + 1,5 dosis pupuk mikro) sebesar $0,08137 \text{ g ha}^{-1}$, sedangkan serapan Zn tertinggi dicapai pada P4 (1 dosis NPK + 1 dosis pupuk mikro) sebesar $0,24696 \text{ g ha}^{-1}$. Perlakuan P7 meningkatkan jumlah cabang hingga tiga cabang per tanaman serta menghasilkan produktivitas tertinggi sebesar $39,50 \text{ t ha}^{-1}$. Nilai RAE pada penelitian mencapai

> 100%, menunjukkan efisiensi pemupukan 209,38% lebih tinggi dibandingkan standar. Hasil ini menegaskan bahwa sinergi dan keseimbangan hara makro dan mikro lebih menentukan produktivitas dibandingkan tingginya serapan satu unsur secara tunggal.

Kata kunci: efisiensi pemupukan; produktivitas tanaman; pupuk mikro Zn–Cu; tomat

PENDAHULUAN

Tomat (*Solanum lycopersicum* L.) merupakan komoditas hortikultura strategis dengan kontribusi penting terhadap ketahanan pangan dan gizi masyarakat karena kandungan vitamin, mineral, dan antioksidannya yang tinggi (White & Broadley, 2011). Secara global, produksi tomat terus menunjukkan tren peningkatan dengan total produksi mencapai lebih dari 190 juta ton pada tahun 2024, menjadikannya salah satu komoditas hortikultura dengan volume produksi tertinggi di dunia. Di Indonesia, produksi tomat tercatat sekitar 1,2–1,3 juta ton per tahun, namun masih menunjukkan fluktuasi dan belum optimal dibandingkan potensi hasilnya. Peningkatan produktivitas tomat secara berkelanjutan menuntut pengelolaan hara yang presisi, karena intensifikasi budidaya tanpa keseimbangan nutrisi sering kali menyebabkan stagnasi hasil dan penurunan efisiensi pupuk (Dhaliwal *et al.*, 2023). Praktik pemupukan di lapangan masih didominasi oleh aplikasi unsur makro N, P, dan K, sementara peran unsur mikro relatif terabaikan meskipun berfungsi vital dalam metabolisme tanaman (Alloway, 2008).

Zinc (Zn) berperan dalam aktivasi enzim, sintesis protein, pembentukan klorofil, serta stabilisasi membran sel sehingga defisiensinya secara langsung menekan pertumbuhan vegetatif dan pembentukan buah (Banakar *et al.*, 2017; Noulas *et al.*, 2018). Copper (Cu) berfungsi dalam sistem transpor elektron, lignifikasi, serta regulasi enzim oksidatif, namun memiliki ambang kecukupan yang sempit sehingga ketidakseimbangan dosis berpotensi menimbulkan stres oksidatif (Kabata-Pendias, 2021; Kumar *et al.*, 2017). Respons tanaman terhadap kedua unsur ini sangat dipengaruhi oleh pH tanah, bahan organik, serta interaksi antagonistik maupun sinergistik antar hara (Alloway, 2008; Khan *et al.*, 2025).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa aplikasi unsur mikro seperti Zn dan Cu mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman melalui peningkatan aktivitas enzim dan efisiensi metabolisme (Banakar *et al.*, 2017; Nguyen *et al.*, 2021). Namun, respons tanaman terhadap

aplikasi unsur mikro tidak selalu linier terhadap peningkatan dosis, melainkan sangat dipengaruhi oleh keseimbangan dengan unsur hara makro serta kondisi lingkungan tumbuh (Alloway, 2008).

Pada tanaman hortikultura seperti tomat, peran unsur mikro menjadi semakin penting karena kebutuhan fisiologis yang tinggi selama fase pembentukan bunga dan buah. Meskipun demikian, kajian mengenai kombinasi pupuk mikro Zn dan Cu dengan pupuk makro NPK serta evaluasinya menggunakan pendekatan *Relative Agronomic Effectiveness* (RAE) pada tanaman tomat masih terbatas.

Zinc (Zn) dan Copper (Cu) berperan penting dalam mendukung kinerja fisiologis dan produktivitas tanaman tomat melalui keterlibatannya dalam berbagai proses metabolisme utama. Zn berfungsi sebagai kofaktor enzim yang terlibat dalam sintesis protein, pembentukan klorofil, serta regulasi hormon pertumbuhan seperti auksin yang memengaruhi pembelahan dan diferensiasi sel. Kecukupan Zn pada tanaman tomat diketahui mampu meningkatkan aktivitas fotosintesis, efisiensi stomata, serta akumulasi biomassa yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan hasil (Yang *et al.*, 2011; Hossain *et al.*, 2024).

Kombinasi antara Zn, Cu, dan unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) menjadi faktor kunci dalam menunjang produktivitas tanaman tomat, karena keseimbangan antar unsur hara menentukan efisiensi proses fisiologis tanaman. Unsur makro berperan sebagai penyusun utama biomassa dan sumber energi metabolik, sedangkan unsur mikro seperti Zn dan Cu berfungsi mengoptimalkan aktivitas enzim, fotosintesis, serta mekanisme regulasi fisiologis tanaman. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sinergi antara unsur hara mikro dan makro mampu meningkatkan efisiensi penggunaan hara, pembentukan cabang, serta hasil buah pada tanaman tomat dibandingkan aplikasi tunggal (Desta, 2022; Alloway, 2008; Baligar *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pengelolaan hara secara seimbang menjadi

pendekatan penting dalam meningkatkan produktivitas tomat secara optimal dan berkelanjutan.

Evaluasi efektivitas pupuk tidak cukup hanya mengukur peningkatan hasil, tetapi juga perlu mempertimbangkan efisiensi agronomis melalui indikator kuantitatif seperti Relative Agronomic Effectiveness (RAE) agar rekomendasi yang dihasilkan lebih presisi dan ekonomis (Baligar *et al.*, 2021). Pendekatan ini penting untuk menghindari over-application unsur mikro yang berpotensi meningkatkan residu tanah dan risiko lingkungan, khususnya pada Cu yang bersifat akumulatif (Kabata-Pendias, 2021).

Berdasarkan celah penelitian tersebut, diperlukan evaluasi komprehensif mengenai respons pertumbuhan, komponen hasil, produktivitas, serta efisiensi pemupukan Zn–Cu pada tanaman tomat. Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas pupuk majemuk mikro Zn–Cu yang dikombinasikan dengan NPK terhadap pertumbuhan dan hasil tomat, serta menilai kinerjanya melalui pendekatan RAE sebagai dasar penetapan dosis pemupukan optimal yang efisien secara agronomis dan berkelanjutan secara lingkungan.

BAHAN DAN METODE

Lokasi dan bahan

Percobaan lapang dilaksanakan pada lahan pertanian di Kelurahan Srigading, Kecamatan Sanden, Kabupaten Bantul DI Yogyakarta, Indonesia pada Januari–April 2025. Tanaman uji adalah tomat varietas Servo.

Rancangan percobaan dan perlakuan

Percobaan disusun menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) faktor tunggal dengan empat blok sebagai ulangan, sehingga terdapat 8 perlakuan × 4 ulangan = 32 satuan percobaan. Tanaman ditanam dengan jarak tanam 50 cm × 60 cm sehingga dalam setiap plot berukuran 1 m × 5 m terdapat 16 tanaman. Percobaan terdiri atas 32 satuan percobaan sesuai dengan rancangan RAKL (8 perlakuan × 4 ulangan), sehingga total populasi tanaman dalam penelitian ini sebanyak 512 tanaman. Setiap plot terdiri atas 16 tanaman, di mana 10 tanaman dipilih secara acak sebagai sampel pengamatan. 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 1 m × 5 m.

Aplikasi pupuk

Pupuk mikro diaplikasikan secara foliar pada umur 3, 5, 7, dan 9 MST dengan konsentrasi 1,50 g L⁻¹ per plot. Sementara itu, pupuk makro diaplikasikan sebanyak tiga kali, yaitu pada 0, 30, dan 50 HST secara tugal dengan dosis setara 100 kg ha⁻¹ Urea, 100 kg ha⁻¹ SP-36, 100 kg ha⁻¹ ZA, dan 100 kg ha⁻¹ KCl. Pemberian pupuk makro dilakukan dengan perbandingan 1:1:1:1/2 (Urea, ZA, SP-36, dan KCl) dengan dosis aplikasi sebesar 2 g tanaman⁻¹ pada setiap waktu pemupukan.

Tabel 1. Dosis perlakuan pemupukan pada tanaman tomat

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	¾ Dosis NPK + 0,5 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75
P4	1 Dosis NPK + 1 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1	1	1	1	1
P5	¾ Dosis NPK + 1 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1	0,75	0,75	0,75	0,75
P6	1 Dosis NPK + 1,5 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1,5	1	1	1	1
P7	¾ Dosis NPK + 1,5 Dosis mikro majemuk Zn + Cu	1,5	0,75	0,75	0,75	0,75

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 cabang) yang diamati berkala pada rumpun contoh di setiap plot; **(2) komponen hasil dan hasil saat panen**. Hasil diukur menggunakan petak panen 1m x 1m per bedeng. Setelah mendapatkan ukuran hasil per petak panen, data tersebut selanjutnya dikonversi ke 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:

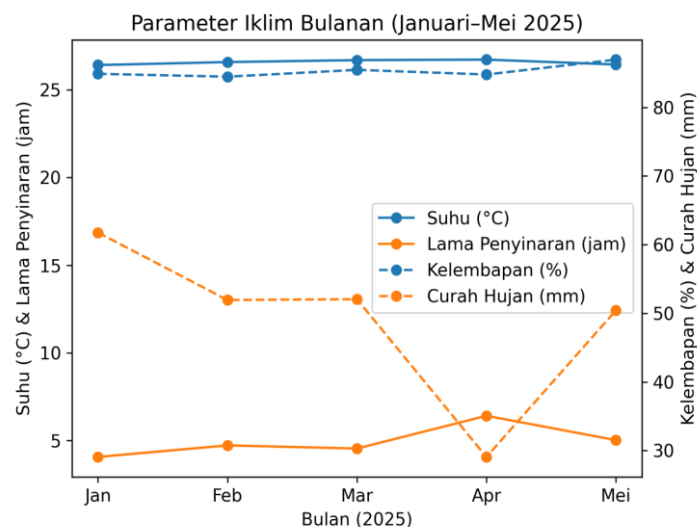
$$RAE = \frac{\text{Hasil pupuk yang diuji} - \text{Kontrol}}{\text{Hasil pupuk standar} - \text{Kontrol}} \times 100\%$$

RAE digunakan untuk membandingkan kinerja agronomis perlakuan pupuk uji terhadap standar atau perlakuan P1 (1 dosis NPK) 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

Kondisi agroklimat selama penelitian pada periode Januari–Mei 2025 relatif stabil dan berada dalam kisaran yang mendukung pertumbuhan tanaman tomat. Suhu rata-rata berkisar antara 26,42–26,73 °C, yang masih berada dalam kisaran optimum pertumbuhan tomat yaitu 25–30 °C. Kelembapan udara relatif cukup tinggi, yaitu antara 84,48–86,97%, yang secara umum mendukung proses fisiologis tanaman seperti fotosintesis dan transpirasi, meskipun berpotensi meningkatkan risiko serangan penyakit apabila tidak dikelola dengan baik (white & Broadley, 2011).

Curah hujan selama penelitian menunjukkan variasi antara 29,07–61,77 mm, dengan kecenderungan penurunan curah hujan yang diikuti oleh peningkatan lama penyinaran matahari hingga 6,41 jam. Variasi ini masih berada dalam kisaran toleransi tanaman tomat, di mana ketersediaan cahaya berperan penting dalam mendukung aktivitas fotosintesis dan pembentukan hasil. Secara umum, kondisi lingkungan selama penelitian tidak menjadi faktor pembatas utama terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman tomat (white & Broadley, 2011; Dhaliwal *et al.*, 2023).



Gambar 1. Parameter iklim bulanan (Januari sd Mei 2025).

Hasil Analisis Tanah Sebelum Pelaksanaan Uji

Berdasarkan data pada (tabel.2) kandungan hara tersedia tanah, kadar Cu tidak menunjukkan perbedaan nyata antarperlakuan, yang ditandai dengan notasi huruf yang sama ("a") pada seluruh perlakuan P0 hingga P7. Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik tidak terdapat pengaruh signifikan terhadap kandungan Cu tanah. Meskipun demikian, secara numerik terlihat kecenderungan peningkatan kadar Cu seiring kenaikan dosis pupuk mikro, dengan nilai terendah pada P0 (7,599 mg kg⁻¹) dan tertinggi pada P7 (11,758 mg kg⁻¹). Peningkatan tersebut menunjukkan adanya kecenderungan akumulasi, namun belum cukup kuat untuk menghasilkan perbedaan yang signifikan.

Sebaliknya, kandungan Zn tersedia menunjukkan variasi yang lebih nyata. Perlakuan P2 (51,476 mg kg⁻¹) dan P7 (50,254 mg kg⁻¹) berada pada kelompok tertinggi (huruf "a"), sedangkan P5 memiliki nilai terendah (38,794 mg kg⁻¹). Namun sebagian besar perlakuan masih berada dalam kelompok huruf yang sama ("ab"), sehingga perbedaannya relatif terbatas. Secara umum, data ini menunjukkan bahwa pemupukan mikro Zn–Cu lebih responsif terhadap

peningkatan Zn dibandingkan Cu, yang kemungkinan dipengaruhi oleh dinamika ketersediaan dan mekanisme penyanggaan hara di dalam tanah.

Hasil Analisis Serapan Hara

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi pupuk mikro Zn–Cu secara nyata meningkatkan serapan hara Cu dan Zn dibandingkan kontrol. Serapan Cu meningkat bertahap dari P0 (0,02323 g ha⁻¹) hingga tertinggi pada P7 (0,08137 g ha⁻¹), dengan perbedaan nyata antarperlakuan. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan suplai Cu melalui pemupukan mendorong peningkatan ketersediaan dan akumulasi Cu dalam jaringan tanaman. Secara fisiologis, Cu berperan dalam sistem enzim oksidatif, fotosintesis, respirasi, serta pembentukan lignin, sehingga peningkatan ketersediaan Cu dapat meningkatkan aktivitas metabolisme tanaman (Kabata-Pendias, 2021; Kumar *et al.*, 2017). Namun demikian, karena Cu memiliki rentang kecukupan–toksisitas yang sempit, peningkatan serapan perlu diinterpretasikan secara hati-hati agar tidak mengarah pada potensi akumulasi berlebih pada aplikasi jangka panjang (Kumar *et al.*, 2017).

Tabel 2. Ketersediaan hara Cu, dan Zn pada Tanah Media Tumbuh

Perlakuan	Kandungan hara tersedia tanah (mg kg ⁻¹)	
	Cu	Zn
P0	7.599 a	48.210 ab
P1	8.745 a	42.888 ab
P2	9.190 a	51.476 a
P3	9.353 a	47.858 ab
P4	9.097 a	47.120 ab
P5	8.163 a	38.794 ab
P6	10.320 a	49.449 ab
P7	11.758 a	50.254 a

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

Tabel 3. Serapan hara Cu, dan Zn pada tanaman tomat

Perlakuan	Serapan hara tanaman (g ha ⁻¹)	
	Cu	Zn
P0	0.02323 e	0.07482 f
P1	0.04470 d	0.11151 ef
P2	0.04084 d	0.12491 def
P3	0.04831 cd	0.14552 cde
P4	0.06173 bc	0.24696 a
P5	0.07325 ab	0.18009 bcd
P6	0.07045 ab	0.19422 abc
P7	0.08137 a	0.21720 ab

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

Serapan Zn juga menunjukkan peningkatan signifikan dibanding kontrol, dengan nilai tertinggi pada perlakuan P4 (0,24696 g ha⁻¹), diikuti P7 dan P6. Pola ini menunjukkan bahwa respons Zn tidak sepenuhnya linier terhadap peningkatan dosis, melainkan memiliki titik respons optimum pada kombinasi tertentu. Secara fisiologis, Zn berperan dalam aktivasi enzim, sintesis protein, pembentukan hormon pertumbuhan (auksin), serta stabilisasi membran sel, sehingga peningkatan suplai Zn dapat meningkatkan efisiensi proses fisiologis tanaman (Banakar *et al.*, 2017; Alloway, 2008). Respons optimum pada P4 mengindikasikan bahwa keseimbangan antara NPK dan Zn–Cu lebih menentukan dibandingkan peningkatan dosis tunggal secara berlebihan.

Perbedaan pola respons antara Cu dan Zn menguatkan bahwa masing-masing unsur mikro memiliki dinamika serapan yang berbeda dalam sistem tanah–tanaman. Serapan hara tidak hanya dipengaruhi oleh dosis aplikasi, tetapi juga oleh interaksi antar unsur hara, pH tanah, bahan organik, serta mekanisme homeostasis tanaman dalam mengatur konsentrasi internal unsur mikro (Alloway, 2008; Khan *et al.*, 2025). Tanaman memiliki kemampuan mengatur translokasi dan akumulasi unsur mikro untuk menjaga keseimbangan fisiologis, sehingga peningkatan dosis tidak selalu diikuti oleh peningkatan serapan secara proporsional.

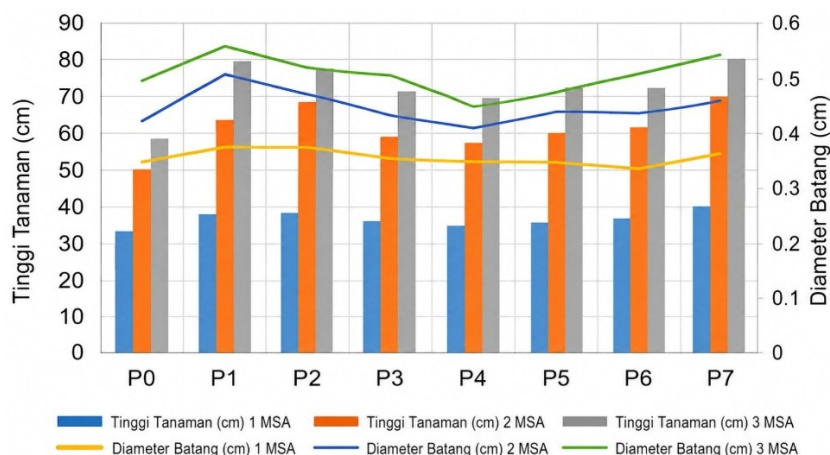
Secara agronomis, peningkatan serapan Zn dan Cu pada perlakuan tertentu menunjukkan bahwa kombinasi pupuk mikro dengan NPK mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara. Namun, tingginya serapan satu unsur tidak selalu berbanding lurus dengan produktivitas tanaman, karena hasil lebih dipengaruhi oleh sinergi dan keseimbangan antara unsur makro dan mikro dalam mendukung pembentukan

biomassa dan hasil panen (Baligar *et al.*, 2021; white & Broadley, 2011). Oleh karena itu, interpretasi efektivitas pemupukan perlu mempertimbangkan hubungan antara serapan hara, pertumbuhan vegetatif, dan hasil akhir tanaman secara terpadu.

Analisis Variabel Hasil Pengukuran (Pertumbuhan dan Hasil)

Data tinggi tanaman menunjukkan bahwa seluruh perlakuan tidak berbeda nyata pada setiap waktu pengamatan (1, 2, dan 3 MSA), yang ditunjukkan oleh notasi huruf yang sama (“a”) berdasarkan uji Tukey-HSD taraf 5%. Pada 1 MSA, tinggi tanaman berkisar antara 33,75 cm (P0) hingga 40,125 cm (P7). Memasuki 2 MSA, terjadi peningkatan pertumbuhan pada seluruh perlakuan dengan kisaran 50,625–69,50 cm. Pada 3 MSA, tinggi tanaman semakin meningkat dengan rentang 59,00–79,00 cm. Secara numerik, perlakuan P7 menunjukkan tinggi tanaman tertinggi pada 1 dan 2 MSA, serta setara tertinggi pada 3 MSA bersama P1 (79,00 cm). Meskipun terdapat kecenderungan peningkatan pada perlakuan tertentu, secara statistik tidak terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan.

Tidak ditemukannya perbedaan nyata antar perlakuan pada tinggi tanaman 1–3 MSA menunjukkan bahwa aplikasi pupuk mikro Zn–Cu belum memberikan respons signifikan pada fase vegetatif awal. Pada tahap ini, pertumbuhan tanaman lebih dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara makro, terutama nitrogen, yang berperan dalam pembentukan jaringan vegetatif dan pemanjangan batang (Baligar *et al.*, 2021). Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh pupuk mikro cenderung lebih nyata pada fase pertumbuhan lanjutan atau pada komponen hasil.



Gambar 2. Pengaruh pemupukan terhadap tinggi tanaman dan diameter batang pada tanaman tomat

Data diameter batang menunjukkan bahwa seluruh perlakuan tidak berbeda nyata pada setiap waktu pengamatan (1, 2, dan 3 MSA), berdasarkan uji Tukey-HSD taraf 5%. Pada 1 MSA, diameter batang berkisar antara 0,3375 cm (P6) hingga 0,375 cm (P1 dan P2). Pada 2 MSA, terjadi peningkatan diameter pada seluruh perlakuan dengan kisaran 0,4125–0,500 cm, di mana nilai tertinggi tercatat pada P1 (0,500 cm). Pada 3 MSA, diameter batang semakin meningkat dengan rentang 0,450–0,550 cm, dan nilai tertinggi diperoleh pada P1 dan P7 (0,550 cm). Meskipun terdapat kecenderungan peningkatan pada beberapa perlakuan, secara statistik tidak terdapat perbedaan signifikan antarperlakuan.

Tidak ditemukannya perbedaan nyata antarperlakuan pada diameter batang 1–3 MSA menunjukkan bahwa aplikasi pupuk mikro Zn–Cu belum memberikan pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan diameter batang pada fase vegetatif awal. Pada tahap ini, pembesaran batang umumnya lebih dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara makro, terutama nitrogen dan kalium, yang berperan dalam pembentukan jaringan struktural dan kekuatan batang (Baligar *et al.*, 2021). Unsur mikro seperti Zn dan Cu lebih berfungsi dalam aktivitas enzimatik, sintesis protein, dan proses lignifikasi sehingga pengaruhnya terhadap diameter batang cenderung bersifat tidak langsung (Alloway, 2008; Kabata-Pendias, 2021). Meskipun secara numerik P1 dan P7 menunjukkan diameter batang lebih besar pada 3 MSA, keseragaman notasi huruf mengindikasikan bahwa variasi dosis pupuk mikro belum mampu menghasilkan respons

diferensial yang signifikan pada fase pertumbuhan ini.

Pada pengamatan 3 MSA, perlakuan menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan fase sebelumnya. Perlakuan P7 menghasilkan jumlah cabang tertinggi, yaitu 3,00 cabang, dan berada pada kelompok huruf “a”, yang berarti berbeda nyata dibandingkan kontrol (P0) yang hanya menghasilkan 1,375 cabang dan berada pada kelompok “b”. Sementara itu, perlakuan P1 hingga P6 berada pada kelompok “ab”, yang menunjukkan bahwa secara statistik tidak berbeda nyata baik dengan P7 maupun P0, meskipun secara numerik nilainya lebih tinggi daripada kontrol. Hasil ini mengindikasikan bahwa pada fase 3 MSA mulai terlihat respons percabangan tanaman terhadap perlakuan pemupukan.

Signifikansi pada 3 MSA menunjukkan bahwa pengaruh pupuk mikro Zn–Cu mulai tampak pada fase vegetatif lanjut, khususnya terhadap pembentukan cabang. Percabangan merupakan indikator penting dalam pertumbuhan vegetatif karena berhubungan langsung dengan pembentukan tajuk dan potensi pembentukan bunga serta buah. Peningkatan jumlah cabang pada P7 mengindikasikan bahwa kombinasi dosis pupuk yang lebih seimbang mampu mendukung aktivitas fisiologis tanaman secara optimal. Zn diketahui berperan dalam sintesis hormon auksin yang memengaruhi pembelahan dan diferensiasi sel, termasuk pembentukan tunas lateral (Banakar *et al.*, 2017; Alloway, 2008). Sementara itu, Cu berperan dalam aktivitas enzim oksidatif dan metabolisme energi yang mendukung pertumbuhan jaringan baru (Kabata-Pendias, 2021).

Tabel 4. Pengaruh pemupukan terhadap jumlah cabang pada tanaman tomat

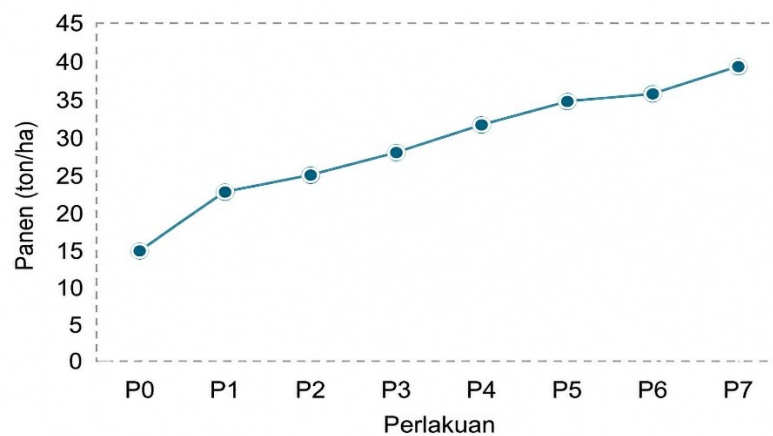
Perlakuan	Variabel Pengamatan		
	Jumlah Cabang		
	1 MSA	2 MSA	3 MSA
P0	1 a	1.25 a	1.375 b
P1	1 a	2.00 a	2.500 ab
P2	1 a	2.25 a	2.375 ab
P3	1 a	2.375 a	2.625 ab
P4	1 a	2.00 a	2.00 ab
P5	1 a	2.25 a	2.625 ab
P6	1 a	2.25 a	2.625 ab
P7	1 a	2.375 a	3.00 a

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

Tabel 5. Pengaruh pemupukan terhadap jumlah cabang pada tanaman tomat

Perlakuan	Hasil (t ha ⁻¹)
P0	14,75 d
P1	22,75 c
P2	25,50 c
P3	28,75 c
P4	32,00 b
P5	35,00 b
P6	36,25 b
P7	39,50 a

Keterangan: Nilai yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Tukey HSD pada taraf 5%



Gambar 3. Pengaruh perlakuan pemupukan terhadap produksi tanaman tomat

Pengaruh perlakuan pemupukan terhadap produksi tanaman tomat

Data hasil panen menunjukkan adanya perbedaan yang nyata antar perlakuan berdasarkan uji Tukey-HSD taraf 5%. Perlakuan P7 menghasilkan produksi tertinggi sebesar 39,50 t ha⁻¹, yang berarti berbeda nyata dibandingkan seluruh perlakuan lainnya. Sebaliknya, kontrol (P0) menunjukkan hasil terendah sebesar 14,75 t ha⁻¹. Data hasil panen disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperjelas perbedaan antar perlakuan.

Terlihat adanya tren peningkatan hasil yang konsisten dari P0 hingga P7 (Tabel 5.), di mana setiap peningkatan kombinasi perlakuan diikuti oleh kenaikan produksi. Perlakuan P5 dan P6 berada dalam kelompok huruf yang sama ("b"), yang menunjukkan bahwa kedua perlakuan tersebut tidak berbeda nyata satu sama lain, meskipun nilainya relatif tinggi (35,00 dan 36,25 t ha⁻¹). Secara umum, data ini menunjukkan bahwa aplikasi pupuk mikro Zn-Cu yang

dikombinasikan dengan NPK mampu meningkatkan hasil panen secara signifikan dibandingkan tanpa aplikasi mikro.

Peningkatan hasil panen yang signifikan pada perlakuan P7 menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk yang lebih optimal mampu meningkatkan produktivitas tanaman secara nyata. Hasil ini mengindikasikan adanya sinergi antara unsur hara makro dan mikro dalam mendukung proses fisiologis tanaman, khususnya pada fase pembentukan dan pengisian buah. Zn berperan penting dalam sintesis protein, pembentukan hormon pertumbuhan, serta aktivitas enzim yang terlibat dalam pembentukan biomassa dan hasil (Banakar *et al.*, 2017; Alloway, 2008). Sementara itu, Cu berperan dalam sistem transpor elektron dan aktivitas enzim oksidatif yang mendukung metabolisme energi dan pembentukan jaringan generatif (Kabata-Pendias, 2021). Hal ini juga didukung adanya sinergi antara unsur hara makro dan mikro dalam mendukung proses

fisiologis tanaman, terutama pada fase pembentukan dan pengisian buah. Unsur Zn berperan dalam meningkatkan efisiensi fotosintesis, sintesis protein, serta pembentukan hormon pertumbuhan, sedangkan Cu berperan dalam sistem transpor elektron dan metabolisme energi yang mendukung pembentukan organ generatif (Yang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2024). Kenaikan hasil yang bertahap dari P0 hingga P7 juga menunjukkan bahwa peningkatan ketersediaan dan serapan hara berdampak langsung terhadap efisiensi pembentukan hasil. Hal ini sejalan dengan konsep nutrient use efficiency, Keseimbangan antara unsur hara makro dan mikro memungkinkan tanaman mengoptimalkan proses fotosintesis, translokasi asimilat, serta pembentukan buah secara lebih efisien (Baligar *et al.*, 2021; white & Broadley, 2011). Hal ini sejalan dengan penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa aplikasi terpadu unsur hara mikro dan makro dapat meningkatkan produktivitas tomat melalui peningkatan aktivitas enzim, efisiensi metabolisme, dan penguatan sistem fisiologis tanaman (Hossain *et al.*, 2024; Desta, 2022). Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa keseimbangan hara, bukan hanya peningkatan dosis tunggal, merupakan faktor kunci dalam meningkatkan produktivitas tanaman tomat.

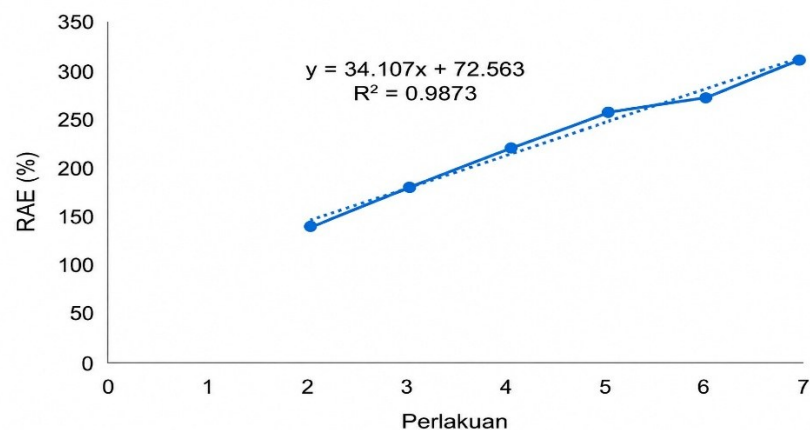
Relative Agronomic Effectiveness (RAE)

Nilai Relative Agronomic Effectiveness (RAE) menunjukkan peningkatan yang konsisten dari perlakuan P2 hingga P7. Nilai RAE terendah terdapat pada P2 sebesar 134,38%, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada P7 sebesar 309,38%. Seluruh perlakuan (P2–P7) memiliki nilai RAE >100%, yang berarti seluruh kombinasi pemupukan mikro Zn–Cu memberikan efektivitas

agronomis lebih tinggi dibandingkan perlakuan standar. Analisis regresi linear menghasilkan persamaan $y = 34,107x + 106,67$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9874$, yang menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat antara peningkatan dosis perlakuan dan nilai RAE. Nilai R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa 98,74% variasi RAE dapat dijelaskan oleh peningkatan tingkat perlakuan.

Nilai Relative Agronomic Effectiveness (RAE) menunjukkan peningkatan yang konsisten seiring dengan peningkatan kombinasi dosis pupuk mikro Zn–Cu dan pupuk makro NPK. Seluruh perlakuan memiliki nilai RAE >100%, yang mengindikasikan bahwa aplikasi pupuk mikro Zn–Cu lebih efektif dibandingkan pemupukan standar dalam meningkatkan hasil tanaman tomat. Nilai RAE tertinggi pada perlakuan P7 menunjukkan bahwa kombinasi dosis tersebut mampu memberikan respons agronomis optimal. Hal ini mencerminkan bahwa peningkatan produktivitas tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah hara yang diserap, tetapi juga oleh efisiensi pemanfaatan hara dalam mendukung proses fisiologis tanaman (Baligar *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2025).

Peningkatan RAE berkaitan erat dengan peningkatan nutrient use efficiency (NUE), di mana tanaman mampu memanfaatkan unsur hara secara lebih efektif untuk menghasilkan biomassa dan hasil yang lebih tinggi. Unsur Zn berperan dalam aktivasi enzim dan regulasi hormon pertumbuhan, sedangkan Cu berperan dalam metabolisme energi dan sistem transpor elektron, sehingga keduanya mendukung efisiensi fotosintesis dan pembentukan hasil (Alloway, 2008; Kumar *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2024; Hossain *et al.*, 2024).



Gambar 4. *Relative Agronomic Efficiency* perlakuan pemupukan tomat

Kombinasi dengan unsur makro seperti N, P, dan K semakin memperkuat efisiensi ini melalui penyediaan substrat utama bagi pembentukan jaringan dan buah. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi unsur hara mikro dan makro secara seimbang dapat meningkatkan efisiensi agronomis dan produktivitas tanaman hortikultura secara signifikan (Desta, 2022; Jat *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2022).

Hubungan linear yang kuat antara peningkatan dosis perlakuan dan nilai RAE menunjukkan bahwa dalam rentang dosis yang diuji, belum terjadi titik jenuh atau penurunan efisiensi pemupukan. Hal ini mengindikasikan bahwa respons tanaman masih positif terhadap peningkatan kombinasi dosis pupuk mikro Zn–Cu. Namun demikian, penggunaan dosis yang lebih tinggi tetap perlu dipertimbangkan secara hati-hati, terutama terkait potensi akumulasi unsur mikro seperti Cu di dalam tanah yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan tanah dalam jangka panjang (Kabata-Pendias, 2021; Cakmak & Kutman., 2018). Oleh karena itu, rekomendasi pemupukan sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan peningkatan hasil, tetapi juga efisiensi agronomis dan keberlanjutan sistem produksi (Khambalkar *et al.*, 2025).

KESIMPULAN

Aplikasi pupuk mikro Zn–Cu yang dikombinasikan dengan NPK terbukti meningkatkan serapan hara, jumlah cabang, dan produktivitas tanaman tomat. Namun demikian, perlakuan tidak memberikan pengaruh nyata terhadap tinggi tanaman dan diameter batang pada fase vegetatif awal (1–3 MSA). Meskipun demikian, peningkatan jumlah cabang dan hasil panen menunjukkan adanya respons positif terhadap keseimbangan hara. Perlakuan P7 menghasilkan produksi tertinggi (39,50 t ha⁻¹) dan nilai RAE tertinggi (309,38%), sehingga merupakan kombinasi dosis paling efektif dalam meningkatkan efisiensi pemupukan dan produktivitas tomat.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B. J. 2008. Micronutrients and Crop Production: An Introduction. Dalam *Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production* (hlm. 1–39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6860-7_1
- Baligar, V.C., Fageria, N.K. and 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/10.1081/CSS-100104098>
- Banakar, R., Alvarez-Fernandez, A., Diaz-Benito, P., *et al.* 2017. Iron and zinc accumulation in biofortified rice. *Journal of Experimental Botany*, 68: 4983–4995. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx304>
- Cakmak, I., Kutman, U.B., 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc. *European Journal of Soil Science*, 69: 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>
- Desta, B. T. (2022). The Synergy of Macro and Micro-Nutrients for Improving Durum Wheat Productivity in Ethiopia: A Review. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 10(2): 33–43. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20221002.13>
- Dhaliwal SS, Sharma V, Verma V, Kaur M, Singh P., *et al.* 2023. Impact of manures and fertilizers on yield and nutrient content under cropping systems. *PLOS ONE*, 18(11): e0292602. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292602>
- Eviati, S., Sulaeman, dan Prasetyo, B.H., 2023. Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk. Bogor: Balai Penelitian Tanah. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/14959>
- Hossain, M.B., Rahman, M.M. and Islam, M.A., 2024. Zinc application improves growth, photosynthesis, and yield of tomato under field conditions. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 12(1): 1–10. [10.1186/s12870-025-07733-x](https://doi.org/10.1186/s12870-025-07733-x)
- Jat, L.K., Singh, Y.V., Meena, S.K., Meena, S.K., Parihar, M., Jatav, H.S., Meena, R.K., & Meena, V.S. 2015. Does Integrated Nutrient Management Enhance Agricultural

- Productivity? *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 9(2): 1211–1221. <https://doi.org/10.22207/JPAM.9.2.45>
- Kabata-Pendias, A., 2021. Trace elements in soils and plants. 5th ed. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Khambalkar, P. A., Agrawal, S., Dhaliwal, S. S., Yadav, S. S., Sadawarti, M. J., Singh, A., Yadav, I. R., Yadav, K., Shivansh, Prasad, D., Singh, A., & Afreen, N. 2025. Sustainable nutrient management balancing soil health and food security for future generations. *Applied Food Research*, 5, 101087. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101087>
- Khan, A., Qadir, M. B., Aslam, M., Habibullah, Ahmad, M., Bibi, S., Khan, B., Bilal, H., Farooq, M., & Ahmed, A. 2025. Soil Nutrient Dynamics and Agronomic Strategies for Sustainable Wheat Production. *Global Research Journal of Natural Science and Technology (GRJNST)*, 3(3). <https://doi.org/10.53762/grjnst.03.03.31>
- Kumar, U. J., Bahadur, V., Prasad, V., Mishra, S., & Shukla, P. 2017. Effect of different concentrations of iron oxide and zinc oxide nanoparticles on growth and yield of strawberry (*Fragaria xananassa* Duch) cv. Chandler. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(8): 2440-2445. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.288>
- Kumar, S., Sharma, S.K., Thakral, S.K., Bhardwaj, K.K., Jhariya, M.K., Meena, R.S., Jangir, C.K., Bedwal, S., Jat, R.D., Gaber, A., *et al.* 2022. Integrated Nutrient Management Improves the Productivity and Nutrient Use Efficiency of *Lens culinaris* Medik. *Sustainability*, 14(3): 1284. <https://doi.org/10.3390/su14031284>
- Lubis, S.T., Putra, E.T.S., Lisa and Muklis, A., 2026. Effect of Zn–Cu micronutrient compound fertilizer on growth and agronomic efficiency of rice. *Journal of Tropical Crop Science*, 13(1): 45–56. <http://doi.org/10.29303/jbt.v26i1.11147>
- Montgomery, D.C., 2017. Design and analysis of experiments. 9th ed. New York: John Wiley & Sons. <file:///Users/macbookpro/Downloads/DesignandAnalysisofExperiments9thEditionPDFDrive.pdf>
- Nguyen, D.V., Nguyen, H.M., Le, N.T., Nguyen, K.H., Nguyen, H.T., Le, H.M., Nguyen, A.T., Dinh, N.T.T., Hoang, S.A., & Ha, C.V. 2021. Copper nanoparticle application enhances plant growth and grain yield in maize under drought stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10301-w>
- Noulas, C., Tziouvalekas, M. and Karyotis, T., 2018. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49: 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>
- Wang, Y., Liu, X. and Zhang, H., 2024. Copper stress affects photosynthesis and antioxidant system in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 210: 105123. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105123>
- White PJ, Broadley MR. 2011. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Front Plant Sci* 17(2): 80. <https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00080>
- Yang XW, Tian XH, Gale WJ, Cao YX, Lu XC, Zhao AQ (2011) Effect of soil and foliar zinc application on zinc concentration and bioavailability in wheat grain grown on potentially zinc-deficient soil. *Cereal Res Commun* 39: 535–543. <https://www.jstor.org/stable/23792319>