

PENINGKATAN EFISIENSI PENGGUNAAN BORON DALAM OPTIMASI PRODUKSI JAGUNG MANIS DI LAHAN KERING

Improving boron use efficiency for optimum production Sweet Corn in Dry Land

Gabryna Auliya Nugroho¹, Muhamad Taufiq Hidayat¹, Georona Kusma Albarki², Siswanto³, Andrean Natajaya³, Syahrul Kurniawan¹

¹Departemen Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya, Jl. Veteran No. 1 Malang, Indonesia.

²Program Studi Magister Pengelolaan Tanah dan Air, Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya, Jl. Veteran No. 1 Malang, Indonesia.

³PT. Dunia Kimia Jaya, Jl. Raya Sukomulyo No.Km 24, Pongangan Krajan, Kec. Manyar, Gresik, Indonesia.

*Penulis korespondensi: gabrynaauliya@ub.ac.id

Abstrak

Rentang antara defisiensi dan toksisitas dalam boron tanaman sangat sempit, sehingga diperlukan dosis pupuk boron yang tepat pada tanaman. Indikator keberhasilan pemupukan boron dapat diukur dari produksi tanaman dan nilai efisiensi penggunaan boron (EPB). EPB dipengaruhi oleh jumlah B tersedia tanah, jenis pupuk, besar input boron, jenis tanaman, serta kecukupan hara makro tersedia (NPK). Disisi lain, aplikasi pupuk dasar NPK dari pupuk anorganik berlebih dapat memicu percepatan degradasi tanah. Saat ini belum banyak dilakukan penelitian yang mengukur penurunan dosis pupuk dasar NPK yang dikombinasikan dengan pupuk boron terhadap EPB tanaman. Kombinasi penurunan dosis pupuk dasar NPK dan pupuk boron diujicobakan pada tanaman jagung manis terhadap produksi dan EPB. Penelitian ini dilakukan dengan rancangan acak kelompok dengan 7 perlakuan, yakni tanpa pemupukan (K0), pemupukan dasar (D1), pemupukan dasar 100% dan borate 50–15% (D2–D4), dan pemupukan dasar 75% dan borate 50–15% (D5–D7). Hasil analisis tanah awal menunjukkan keberadaan boron yang rendah pada tanah, sehingga pemupukan boron diperlukan untuk menyediakan hara bagi tanaman jagung manis. Aplikasi pupuk dasar NPK (100%) dan penambahan pupuk borate dosis 50-100% (~3-6 kg/ha) secara signifikan meningkatkan pertumbuhan, biomassa jagung manis, serapan B, boron *recovery efficiency* (BRE), dan rasio efisiensi pemupukan B, dibandingkan pupuk dasar yang lebih rendah. Berdasarkan estimasi kurva respon, dosis rekomendasi untuk mencapai produksi jagung manis secara optimum-maksimum dan BRE maksimum adalah pemupukan anorganik makro 100% (urea, SP-36, KCl) dan pupuk borate 5,72 – 6,75 kg/ha.

Kata kunci: *Boron Recovery Efficiency, borate, dosis rekomendasi, kernite, Zea mays*

Abstract

The range between boron deficiency and toxicity in plants is utterly narrow, so that the certain dose of boron fertilizer is required for plants. Indicators of optimum boron fertilization can be measured from plant production and boron use efficiency (BUE) value. BUE influenced by the amount of soluble B-soil, type of B fertilizer, amount of boron input, type of plant, and adequacy of available macronutrients (NPK). However, excessive application of NPK base fertilizer from inorganic fertilizers can trigger soil degradation. Currently, there has not been much research that measures the reduction in the dose of NPK base fertilizer combined with boron fertilizer on plant BUE. The combination of reducing the dose of NPK base fertilizer and boron fertilizer was tested on sweet corn plants on production and BUE. This study was conducted with a randomized block design with 7 treatments, namely without fertilization (K0), base fertilization (D1), 100% base fertilization and 50–15% borate (D2–D4), and 75% base fertilization and 50–15% borate (D5–D7). The results of the initial soil analysis showed low boron content in the soil, so borate fertilization was required to provide nutrients for sweet corn plants. Application of NPK base fertilizer (100%) and addition of borate fertilizer at a dose of 50-100% (~3-6 kg/ha) significantly increased growth, plant biomass, B uptake, boron recovery efficiency (BRE), and B fertilizer efficiency ratio, compared to lower NPK-base fertilizer. Based on the estimated response curve, the recommended dose to achieve optimum-maximum

sweet corn production and maximum boron recovery efficiency is 100% macro inorganic fertilization (urea, SP-36, KCl) combined with 5.72-6.75 kg/ha borate fertilizer.

Keywords : *Boron Recovery Efficiency, borate, kernite, recommendation dosage, Zea mays*

Pendahuluan

Boron merupakan unsur hara mikro yang dibutuhkan oleh tanaman dengan fungsi utama sebagai pendorong sintesis RNA untuk pembentukan sel, penebalan dinding sel, dan peningkatan stabilitas membrane sel. Pemupukan boron banyak dilakukan pada komoditas pertanian dengan struktur sel tebal dan biomassa yang kokoh seperti jagung manis (Nugroho et al., 2024), kelapa sawit (Prasetyanto et al., 2024), dan kopi (Ramirez-Builes et al., 2024). Kekahatan boron dapat menghambat pembelahan sel hingga menurunkan kemampuan reproduksi tanaman ber dinding sel tebal. Boron secara umum di lahan pertanian telah ada secara alami dari pelapukan batuan dengan kisaran 0,5 sampai dengan 2,0 ppm (total boron dalam tanah). Namun, unsur hara Boron yang tersedia bagi tanaman hanya berkisar 0,5 hingga 2,5% dari total boron dalam tanah (Das et al., 2019). Sedikitnya jumlah boron tersedia menjadi pembatas bagi pertumbuhan dan produksi berbagai jenis tanaman. Meski kebutuhan boron dalam tanaman sangat sedikit, namun berfungsi penting pada metabolisme tanaman, yaitu translokasi karbohidrat, transportasi gula, protein, enzim, asam nukleat, dan hormon pertumbuhan yang penting untuk mendukung perkembangan tanaman (Halder et al., 2022). Rentang kandungan boron dalam tanaman sangat sempit antara defisiensi dan toksisitas, sehingga pasokan boron yang tidak memadai akan menunjukkan dampak merugikan pada hasil produksi tanaman. Secara umum, tanah dengan kadar boron tersedia kurang dari 0,5 ppm dianggap sebagai kekurangan boron; 0.7 ppm adalah kadar optimal; dan lebih tinggi dari 1,5 ppm adalah toksisitas boron (Brdar-Jokanović, 2020). Defisiensi boron pada tanaman menurunkan laju fotosintesis dan transportasi hasil fotosintesis. Lebih lanjut, kekahatan boron menurunkan daya reproduksi tanaman seperti berkurangnya jumlah serbuk sari, ukuran serbuk sari, dan perkecambah serbuk sari yang mengakibatkan peningkatan gugur bunga, ukuran buah berkurang, dan pembentukan biji sedikit (Ramirez-Builes et al., 2024). Sebaliknya, kasus toksisitas boron jarang ditemukan, namun utamanya disebabkan karena tingginya kadar boron tersedia alami di tanah. Apabila tanaman menyerap boron terlalu tinggi, maka daun akan mengalami klorosis dan nekrosis, diikuti dengan penurunan

jumlah anakan, buah, dan produksi tanaman, sesuai dengan kurva kuadratik (Brdar-Jokanović, 2020). Oleh karena itu, diperlukan pemupukan pupuk mikro boron dengan dosis tepat untuk mencukupi kebutuhan unsur mikro diantara rentang defisiensi dan toksisitas, salah satunya dengan menentukan kebutuhan boron berdasarkan kandungan B dalam tanah dan pengukuran efisiensi penggunaan boron (EPB).

Boron diperoleh dari penambangan endapan mineral yang terkonsentrasi akibat aktivitas vulkanik. Terdapat beberapa mineral sumber pupuk boron, salah satunya adalah mineral Kernite ($\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$) yang telah mengalami pemanasan dalam tekanan tinggi sehingga dihasilkan mineral boron yang kering (*less hydrated*) (Power & Woods, 1997). Karakter mineral kernite menghasilkan sifat pupuk boron dengan kelarutan tinggi dan stabilitas rendah (secara fisiko-kimia). Boron berbentuk B_2O_3 dalam pupuk dan akan mengalami hidrolisis (oksidasi menjadi asam) pada tanah. Tanaman menyerap boron dalam bentuk asam borat (H_3BO_3). Unsur ini satu-satunya unsur hara yang tidak berbentuk ionic serta memiliki sedikit kecenderungan untuk terserap pada koloid tanah bermuatan negatif. Pada daerah tropis dengan curah hujan yang tinggi, kelarutan B cukup tinggi dan memungkinkan terjadinya pencucian boron (Sarkar et al., 2007). Sebaliknya, lahan kering cenderung memiliki kadar boron yang tinggi pada tanah, khususnya bila tanah memiliki EC dan salinitas yang tinggi (Nsouli et al., 2006).

Efisiensi penggunaan boron (EPB) dapat dipengaruhi oleh jenis tanaman, jenis mineral pupuk boron, jumlah input boron melalui pupuk, dan jumlah boron tersedia pada tanah. Beberapa penelitian pengukuran EPB pada tanaman telah dilakukan (Gracia et al., 2024; Sarkar et al., 2007; Teeter-Wood et al., 2023) yang mengungkap bahwa kesuksesan pemupukan boron bergantung pada kecukupan unsur hara makro tanaman. Indikator efisiensi penggunaan hara yang banyak dibahas adalah *recovery efficiency* dari unsur hara, yakni pengukuran efisiensi hara berdasarkan selisih serapan hara *treatment* dikurangi control yang dibandingkan dengan total input hara (hara tersedia tanah dan input pupuk) (Good et al., 2004) (Dobermann, 2007).

Aplikasi pupuk mikro pada umumnya dilakukan untuk melengkapi pupuk anorganik makro primer (N, P, K) sebagai upaya pemupukan berimbang baik unsur hara makro dan mikro. Unsur hara nitrogen (N) merupakan nutrisi penting bagi jagung dan penentu utama hasil panen biji-bijian, terutama melalui perannya dalam fotosintesis dan proses metabolisme lainnya seperti penyerapan air dan unsur hara, penyimpanan di vakuola, dan pengangkutan xylem (Aziiba et al., 2019). Unsur hara fosfor (P), merupakan unsur hara esensial yang berperan dalam peningkatan pertumbuhan akar, kekuatan batang yang lebih besar, peningkatan kualitas tanaman, kematangan tanaman yang seragam dan lebih awal, dan peningkatan produksi biji-bijian (Roth et al., 2006). Unsur hara makro esensial primer yang ke tiga adalah kalium (K). Kalium memiliki fungsi penting dalam hubungan air-tanaman. Kalium mengatur keseimbangan ion di dalam sel dan juga memainkan peran penting dalam aktivasi lebih dari 60 enzim yang mengkatalisis berbagai proses metabolisme dan serapan serta translokasi nitrat dari akar ke bagian udara tanaman (Amanullah et al., 2016).

Tingginya input pupuk anorganik NPK dapat memicu degradasi kesuburan tanah. Upaya penurunan jumlah pupuk anorganik dasar NPK diduga dapat meningkatkan efisiensi pupuk dan produksi tanaman jika dikombinasikan dengan pupuk mikro borate. Salah satu komoditas umum yang ditanam pada lahan kering adalah jagung manis, selain berstruktur kokoh dan merupakan tanaman biji-bijian, jagung manis merupakan tanaman yang peka terhadap defisiensi unsur B, sehingga cocok digunakan sebagai tanaman indikator penelitian. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji penurunan dosis pupuk dasar NPK dan pemupukan boron terhadap efisiensi pemupukan, pertumbuhan dan produksi tanaman jagung (*Zea mays* L. Saccharata Sturt) di lahan kering karena penelitian yang serupa belum dijumpai.

Bahan dan Metode

Persiapan lahan dan penanaman

Lahan uji coba pengujian pemupukan boron pada tanaman jagung manis berada di Kelurahan Junrejo, Kota Batu yang dilakukan pada bulan Februari hingga Juli 2024. Sampel tanah dan tanaman dianalisis di Laboratorium Kimia Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya. Penelitian dilakukan dalam 3 tahap utama yakni persiapan lahan dan perhitungan kebutuhan pupuk,

percobaan di lapangan, dan analisis sampel tanah serta tanaman di laboratorium.

Sampel tanah pada kedalaman 0-20 cm diambil sebelum penanaman pada plot penelitian untuk pengukuran analisis dasar tanah (kondisi awal tanah). Metode pengambilan sampel tanah dilakukan secara komposit dari 10 titik yang diambil secara zig-zag pada plot penelitian, diperoleh 3 sampel komposit tanah untuk analisis dasar kandungan N, P, K, C Organik, pH, dan boron tersedia tanah. Petak penelitian dibuat dengan ukuran 4x5 m, dengan total terdapat 21 petak penelitian. Benih jagung manis ditanam pada guludan yang telah disiapkan dengan jarak 60- x25 cm. Varietas jagung manis yang digunakan sebagai bahan penelitian adalah varietas Paragon dengan umur panen ± 70 hari setelah tanam. Perawatan tanaman jagung manis yang dilakukan meliputi pengairan, penyiangan gulma, serta pengendalian hama/penyakit. Kegiatan pengairan di petak perlakuan tanaman jagung dilakukan secara rutin baik pada fase vegetatif maupun generatif hingga tanah dalam kondisi kapasitas lapangan.

Rancangan Penelitian

Penelitian ini disusun menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK); 7 perlakuan dan 3 ulangan dengan total 21 satuan percobaan (Tabel 1). Perlakuan tanpa pemupukan digunakan sebagai kontrol (D0) dan perlakuan pemupukan dasar (100% pupuk dasar anorganik NPK) dirancang sebagai *baseline* pengukuran efisiensi pemupukan (D1). Pupuk dasar NPK untuk tanaman jagung manis diberikan sesuai dosis Permentan No 13 tahun 2022 yakni 350 kg Urea/ha, 100 kg SP36/ha, dan 50 kg KCl/ha, dengan kebutuhan hara 161 kg N/ha, 36 kg P₂O₅/ha, dan 30 kg K₂O/ha (D2-D4). Penurunan dosis pupuk anorganik NPK menjadi 75% digunakan untuk pengujian efisiensi pemupukan (D4-D6). Kegiatan pemupukan pada penelitian ini dilakukan sebanyak dua kali selama satu musim tanam tanaman jagung manis, yang terdiri dari aplikasi pupuk tahap I yang dilakukan pada 14 hari setelah tanam dan aplikasi tahap II yang dilakukan pada 30 hari setelah tanam. Aplikasi pupuk anorganik NPK pada tahap I dilakukan dengan komposisi 60% urea, 100% SP-36 dan 50% KCl. Tahap II dilakukan aplikasi 40% urea dan 50% KCl. Aplikasi boron diberikan dengan pupuk borate berbahan mineral Kernite (Na₂[B₄O₅(OH)₄.2H₂O) (48% B₂O₃) dengan dosis 6 kg/ha. Pemberian pupuk borate diaplikasikan dalam 3 taraf yakni 50%, 100%, dan 150% dengan dosis 3, 6, dan 9 kg

pupuk borate/ha secara berturut-turut. Aplikasi pupuk borate menjadi 3 taraf (50-150%) bertujuan untuk membuat rentang dosis pupuk borate dan kebutuhan untuk penentuan dosis rekomendasi

pemupukan. Pemupukan borate diaplikasikan dengan metode *spraying* pada tanah sejumlah masing-masing 50 % dosis pada tahap I dan II.

Tabel 1. Rancangan penelitian dan aplikasi pemupukan pada lahan percobaan.

Perlakuan	Kebutuhan Pupuk (kg/ha)				Kebutuhan hara (kg/ha)			
	Urea	SP36	KCl	Borate	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	B ₂ O ₃
D0 Kontrol	0	0	0	0	0	0	0	0
D1 100% Pupuk Anorganik	350	100	50	0	161	36	30	0
D2 100% Pupuk Anorganik + 50% borate	350	100	50	3	161	36	30	1.44
D3 100% Pupuk Anorganik + 100% borate	350	100	50	6	161	36	30	2.88
D4 100% Pupuk Anorganik + 150% borate	350	100	50	9	161	36	30	4.32
D5 75% Pupuk Anorganik + 50% borate	262.5	75	37.5	3	120.75	27	22.5	1.44
D6 75% Pupuk Anorganik + 100% borate	262.5	75	37.5	6	120.75	27	22.5	2.88
D7 75% Pupuk Anorganik + 150% borate	262.5	75	37.5	9	120.75	27	22.5	4.32

Pengamatan pertumbuhan dan produksi tanaman jagung manis

Pengamatan pertumbuhan tanaman (tinggi tanaman dan jumlah daun) diukur setelah tanaman jagung manis berumur 3 minggu setelah tanam (MST); Setiap 3 minggu sekali hingga 9 minggu setelah tanam (3, 6, 9, MST), untuk melihat konsistensi pertumbuhan jagung manis dalam interval waktu sejak tumbuh hingga masuk ke fase generatif. Tinggi tanaman diukur dari permukaan tanah hingga titik tumbuh tertinggi tanaman jagung, sedangkan jumlah daun tanaman jagung manis dihitung pada daun yang telah terbuka sempurna. Hasil produksi tanaman jagung manis ditimbang dari hasil panen dengan kondisi tongkol terbungkus klobot (tanpa dikering udarkan). Selanjutnya, hasil produksi jagung manis per petak dikonversi ke satuan ton/hektar. Pada saat panen, sampel tanaman diambil sejumlah 3 sampel per satuan penelitian sebagai bahan pengukuran biomassa tanaman dan analisis jaringan tanaman di laboratorium. Penimbangan berat biomassa tanaman dilakukan pada sampel jagung manis yang telah dioven dengan suhu 65°C selama 3 hari. Pengukuran biomassa tanaman bertujuan untuk dapat mengkuantifikasi berapa besar tubuh tanaman yang terbentuk selama 1 musim tanam. Nilai biomassa tanaman dapat mengindikasikan tingkat pertumbuhan, kesehatan, dan efisiensi penggunaan hara oleh tanaman. Setelah itu, sampel yang telah kering dihaluskan menggunakan grinder tanaman di Laboratorium Pengeringan, Fakultas Pertanian, lalu sampel dihomogenkan hingga lolos ayakan 0,5 mm. Analisis boron jaringan tanaman dilakukan di Laboratorium Kimia, Fakultas MIPA

Universitas Brawijaya dengan alat spektrofotometri UV-Vis. Serapan unsur hara B tanaman (mg/tanaman) dihitung melalui persamaan kadar unsur hara B di tanaman (ppm) dikalikan dengan berat kering biomassa per tanaman, sedangkan pengukuran serapan hara Boron untuk EPB dikonversi dari mg/tanaman ke kg/ha menggunakan perhitungan matematis.

Efisiensi Penggunaan Boron (EPB)

Pengukuran efisiensi penggunaan boron (EPB) dianalisis dengan 2 metode yakni boron *recovery efficiency* (BRE) (a) dan rasio *uptake efficiency* (b). *Boron recovery efficiency* adalah penentuan persentase serapan B tanaman dari jumlah boron tersedia pada tanah dan B-pupuk, sedangkan *uptake efficiency* boron adalah rasio serapan B tanaman dengan input boron dari boron tersedia pada tanah dan B-pupuk. Kedua rumus perhitungan efisiensi pemupukan boron (EPB) tertera di bawah ini:

Boron *recovery Efficiency* (%) (BRE) =

$$\frac{Uptake Bn (kg. ha - 1) - Uptake B0(kg. ha - 1)}{Input B (kg. ha - 1)} \times 100$$

(a) modifikasi dari Dobermann (2007)

Uptake Bn = serapan Boron pada perlakuan ke - n (kg/ha)

Uptake B0 = rerata serapan Boron pada perlakuan control (D0) (kg B/ha)

Input B = Jumlah Boron dari pupuk borate yang diaplikasikan + boron tersedia tanah (kg B/ha)

Boron *Uptake Efficiency* =

$$\frac{Uptake Bn (kg. ha - 1)}{Input B (kg. ha - 1)}$$

(b) modifikasi dari Good et al., (2004)

$Uptake\ B_n = \text{serapan Boron pada perlakuan ke-n (kg/ha)}$
 $Input\ B = \text{Jumlah Boron dari pupuk borate yang}$
 $\text{diaplikasikan} + \text{boron tersedia tanah (kg}$
 B/ha)

Analisis data

Manajemen data penelitian di tata dalam software Ms Excel 2021. Data dianalisis dengan menggunakan software R *Studio*. Analisis normalitas data dengan uji Shapiro-Wilk digunakan untuk mengetahui apakah data terdistribusi normal. Jika data tidak berdistribusi normal, transformasi logaritmik (basis 10) dilakukan. Setelah data terdistribusi normal, analisis pengaruh kombinasi pemupukan NPK dan mikro boron terhadap pertumbuhan, produksi, dan EPB ditelaah dengan uji F atau uji analisis of variance (ANOVA). Uji lanjut dengan Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf 5% dilakukan bila hasil uji F menunjukkan hasil yang berbeda nyata ($p < 0.05$). Dosis optimum pupuk ditentukan dengan menggunakan Model Regresi Kuadratik hubungan antara dosis pupuk dengan produksi dan efisiensi penggunaan hara B.

Hasil dan Pembahasan

Ketersediaan hara tanah sebelum pemupukan

Secara umum, lahan percobaan memiliki kriteria kesuburan tanah yang rendah karena memiliki kandungan C-organik, N total tanah, dan K-dd pada kriteria rendah (Tabel 2), akan tetapi unsur hara P tersedia dalam tanah tergolong dalam kriteria sangat tinggi sehingga penambahan kedua unsur tersebut melalui pupuk relatif lebih rendah dibandingkan dengan penambahan unsur N. Kandungan unsur hara mikro Boron juga tersedia dalam tanah dalam kondisi tergolong sangat rendah. Oleh karena itu, aplikasi pupuk borate sebagai pelengkap pupuk anorganik makro standar (N, P, dan K) diharapkan bekerja efektif untuk menunjang pertumbuhan dan produksi jagung manis yang optimal, serta meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk anorganik makro seperti Urea, SP-36, dan KCl.

Tabel 2. Ketersediaan hara tanah pada lahan percobaan sebelum perlakuan.

Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Metode
pH H ₂ O	-	6.4	Elektrometri
pH KCl	-	5.8	Elektrometri

C Organik	%	0.91	Walkley and Black
N total	%	0.1	Kjeldahl
C/N	-	9	-
P tersedia	mg kg ⁻¹	32.75	Bray I
K dd	me 100g ⁻¹	0.29	NH ₄ OAC1N pH:7
B tersedia	ppm	0	HCl 0,1N

Tinggi Tanaman (cm)

Tinggi tanaman jagung meningkat seiring dengan bertambahnya umur tanaman jagung manis dan ketersediaan unsur hara yang cukup di dalam tanah. Pertumbuhan tinggi tanaman jagung manis dari berbagai perlakuan pemupukan (seperti pupuk anorganik makro, kombinasi pupuk anorganik makro dengan pupuk borate dan kontrol/tanpa pemupukan) tidak berbeda nyata ($P > 0,05$) selama 6 minggu setelah tanam (MST). Hal ini diduga karena ketersediaan unsur hara dalam tanah masih mencukupi kebutuhan tanaman jagung manis. Perbedaan pertumbuhan tinggi tanaman jagung manis dari aplikasi berbagai dosis baru memberikan pengaruh yang berbeda nyata ($P < 0,05$) pada minggu ke-9 (Tabel 3). Perlakuan kontrol tanpa pupuk anorganik makro dan pupuk anorganik borate secara umum menghasilkan tinggi tanaman jagung manis yang lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan pemupukan, baik pupuk anorganik makro standar seperti Urea, SP-36, KCl (D1) maupun pupuk anorganik makro + pupuk borate dosis 50%-150%.

Pada minggu ke-9 setelah tanam, tinggi tanaman jagung manis pada semua perlakuan berkisar antara 52,5 cm – 102,9 cm (Tabel 3). Penurunan dosis aplikasi pupuk anorganik makro standar (urea, SP-36, KCl) sebesar 25% dan dikombinasi dengan aplikasi pupuk mikro borate dosis 100% rekomendasi (D6) mampu menghasilkan tinggi tanaman jagung manis yang sebanding dengan aplikasi pupuk anorganik makro standar dosis 100% rekomendasi (D1) dan pupuk anorganik standar dosis 100% + pupuk mikro borate dosis 50%-150% (D2, D3, D4). Kombinasi pupuk anorganik makro standart dan pupuk mikro borate pernah diteliti sebelumnya pada kacang hijau dan mustard, dimana terdapat peningkatan tinggi tanaman. Penambahan borate secara foliar di cabang dan bunga dengan konsentrasi sebesar 0.2% boron dan pemupukan dasar NPK dapat meningkatkan pertumbuhan tinggi tanaman kacang hijau di daerah subtropis (Halder et al., 2022). Hasil yang sama juga diperoleh dari penelitian Sarkar et al. (2007) bahwa kombinasi aplikasi pupuk boron

1.5 kg B/ha pada tanah dan 0.25 kg B/ha secara foliar akan meningkatkan tinggi tanaman mustard secara signifikan dibandingkan kontrol (tanpa pupuk boron), setelah diberi pemupukan anorganik makro standart. Boron berperan penting dalam pertumbuhan tanaman jagung khususnya untuk pengangkutan karbohidrat, aktivator hormon auksin, integrasi dinding sel, dan pembelahan sel pada buah dan pengangkutan gula ke organ tanaman pada saat perkembangan tongkol jagung (Hayat et al., 2023).

Jumlah daun tanaman

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah daun tanaman jagung manis meningkat seiring bertambahnya umur tanaman. Perbedaan perlakuan dosis pemupukan tidak memberikan pengaruh yang berbeda nyata ($P > 0,05$) terhadap jumlah daun tanaman jagung manis (Tabel 4) pada awal fase pertumbuhan sampai dengan fase generatif yaitu 3, 6, dan 9 MST. Tabel 4 menunjukkan perbedaan dosis kombinasi pupuk anorganik makro standar (urea, SP-36, KCl) dengan pupuk mikro borate memiliki pola pertumbuhan

jumlah daun yang sebanding. Jumlah daun yang diperoleh pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan jumlah daun tanaman jagung manis varietas Paragon yang tertera dalam deskripsi varietas, yang berkisar antara 14-16 helai daun. Semakin banyak jumlah daun akan meningkatkan proses fotosintesis sehingga fotosintat yang dihasilkan cukup tersedia untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman (Fujiyama et al., 2019).

Namun demikian, proses fotosintesis bukan hanya dipengaruhi oleh jumlah daun tetapi juga ditentukan oleh luas daun. Hal ini didasarkan pada pernyataan Hu et al. tahun 2023 bahwa peningkatan luas daun berdampak pada meningkatnya cahaya yang diserap oleh daun, kemudian proses fotosintesis akan meningkat dan menghasilkan asimilat yang akan digunakan sebagai sumber energi pertumbuhan dalam membentuk organ-organ vegetatif pada fase pertumbuhan, sedangkan pada fase generatif asimilat yang disimpan pada jaringan organ-organ vegetatif akan ditransfer untuk pembentukan organ reproduktif seperti pengisian biji.

Tabel 3. Tinggi Tanaman jagung manis pada rentang waktu tertentu pasca pemupukan.

Kode	Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm)		
		3 MST	6 MST	9 MST
D0	Kontrol	15.7	30	52 c
D1	100% Pupuk Anorganik	23.3	56.7	102.7 a
D2	100% Pupuk Anorganik + 50% borate	11	39.7	82.0 ab
D3	100% Pupuk Anorganik + 100% borate	15.3	45	86.3 ab
D4	100% Pupuk Anorganik + 150% borate	19.3	45	89.3 ab
D5	75% Pupuk Anorganik + 50% borate	12	39.7	78 ab
D6	75% Pupuk Anorganik + 100% borate	12.3	37	79.3 ab
D7	75% Pupuk Anorganik + 150% borate	13.7	39.7	74.7 bc
F prob		0.243	0.18	0.0197 *

Keterangan: Nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan. Rata-rata yang diikuti oleh huruf yang berbeda berbeda secara signifikan pada $p \leq 0,05$ dengan uji lanjut Duncan;

Tabel 4. Jumlah Daun Tanaman jagung manis pada rentang waktu tertentu pasca pemupukan.

Kode	Perlakuan	Jumlah daun (helai)		
		3 MST	6 MST	9 MST
D0	Kontrol	5bc	5	7
D1	100% Pupuk Anorganik	6a	6	8
D2	100% Pupuk Anorganik + 50% borate	5abc	5	9
D3	100% Pupuk Anorganik + 100% borate	5abc	5	10
D4	100% Pupuk Anorganik + 150% borate	6ab	6	9
D5	75% Pupuk Anorganik + 50% borate	4c	4	8
D6	75% Pupuk Anorganik + 100% borate	5abc	5	9
D7	75% Pupuk Anorganik + 150% borate	6ab	6	8
f prob		0.0485 *	0.266	0.135

Keterangan: Nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan. Rata-rata yang diikuti oleh huruf yang berbeda berbeda secara signifikan pada $p \leq 0,05$ dengan uji lanjut Duncan

Hasil penelitian (Fujiyama et al., 2019) menunjukkan bahwa aplikasi borate pada tanaman gandum dapat meningkatkan index luas daun secara signifikan mencapai 18% lebih tinggi dibandingkan tanpa pemupukan boron. Defisiensi Boron mengakibatkan berkurangnya translokasi fotosintat, terhambatnya pembelahan sel, dan menurunkan kemampuan reproduksi tanaman. Tanaman akan mengalami kendala dalam berproduksi jika salah satu faktor pendukung pertumbuhan tidak terpenuhi seperti yang dikemukakan dalam Hukum Minimum oleh Julius von Liebig dan Carl Sprengel (Schulze et al., 2019). Sebaliknya, pemberian unsur hara yang berlebihan juga tidak berdampak signifikan terhadap tinggi tanaman, seperti yang ditunjukkan dari perlakuan aplikasi pupuk mikro borate dosis 150% yang menghasilkan tinggi tanaman dan jumlah daun jagung manis sebanding dengan dosis aplikasi 50% dan 100%.

Berat Kering Tanaman dan Produksi Jagung Manis

Aplikasi pupuk anorganik makro (urea, SP-36, KCl) dan mikro borate berpengaruh sangat nyata pada hasil panen tanaman jagung manis ($P < 0,01$) baik biomassa per tanaman maupun produksi per hektar di lahan kering pada daerah tropis (Tabel 5). Penyerapan hara tanaman yang baik diikuti dengan pertumbuhan bagian-bagian tanaman secara optimal. Biomassa yang tinggi umumnya menunjukkan bahwa tanaman memiliki

kondisi lingkungan yang mendukung, termasuk kecukupan air, cahaya, dan nutrisi (Nugroho et al., 2024). Biomassa tanaman jagung manis dari berbagai perlakuan berbagai dosis pupuk mikro borate dan kombinasinya dengan pupuk anorganik makro standar (urea, SP-36, dan KCl) berkisar antara 62,37–347,60 gram/tanaman. Pemupukan B dengan berbagai dosis pupuk anorganik mikro (pupuk borat) dan kombinasinya dengan pupuk anorganik makro signifikan meningkatkan biomassa tanaman sebesar 318–457% dibandingkan kontrol. Pemberian pupuk anorganik makro dengan dosis yang lebih rendah 25% dengan pemupukan boron dosis 50%-150% juga mampu menghasilkan biomassa yang sama besar dengan pemberian pupuk anorganik 100%. Pengurangan dosis pupuk anorganik tunggal sebesar 25% signifikan meningkatkan biomassa sebesar 318% dan 114% dibandingkan kontrol (D0) dan dosis pupuk makro standar (D1) secara berturut-turut. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ketersediaan unsur B melalui aplikasi pupuk anorganik mikro borate berdampak pada biomassa di tanaman. Boron terlibat dalam menjaga integritas struktural dan fungsional dinding dan membran sel, fluks ion, pembelahan dan pemanjangan sel, serta berbagai jalur yang terkait dengan metabolisme dan transportasi sehingga pemupukan boron akan diikuti dengan pembentukan biomassa tanaman (Teeter-Wood et al., 2023).

Tabel 5. Berat kering tanaman dan produksi jagung pasca pemupukan boron.

Kode	Perlakuan	Berat Kering Tanaman (gram/tan)	Produksi (ton/ha)
D0	Kontrol	62.3b	7.1b
D1	100% Pupuk Anorganik	121.7b	16.7a
D2	100% Pupuk Anorganik + 50% borat	268.7a	20.6a
D3	100% Pupuk Anorganik + 100% borat	348a	19.6a
D4	100% Pupuk Anorganik + 150% borat	275.3a	19a
D5	75% Pupuk Anorganik + 50% borat	310a	19.3a
D6	75% Pupuk Anorganik + 100% borat	261a	20.7a
D7	75% Pupuk Anorganik + 150% borat	268.7a	16.6a
f prob		0.00183 **	0.0063 **

Keterangan: Nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan. Rata-rata yang diikuti oleh huruf yang berbeda berbeda secara signifikan pada $p \leq 0,05$ dengan uji lanjut Duncan

Produktivitas jagung manis dari semua perlakuan aplikasi pupuk anorganik hara mikro (pupuk borat) yang dikombinasi dengan pupuk anorganik makro standar dosis 75% (16,64–20,75 ton/ha) sebanding dengan produktivitas jagung

manis varietas Paragon yaitu antara 19,61–28,77 ton/ha. Penurunan dosis pupuk anorganik (urea, SP-36, dan KCl) sebesar 25% menghasilkan produksi jagung manis yang sama besar dengan pemupukan anorganik 100%. Akan tetapi semakin

tinggi dosis pupuk boron yang diaplikasikan (150% dosis), ditemukan penurunan produksi jagung manis. Aplikasi pemupukan boron 9 kg/ha (150% dosis) baik dengan pupuk anorganik 100% dan 75% menunjukkan penurunan produksi dibandingkan aplikasi pupuk yang lebih rendah dosis 50%-100% (~3-6 kg/ha). Kombinasi pupuk anorganik dasar dan pemupukan borat dosis 50%-100% (~3-6 kg/ha) mampu meningkatkan produksi tanaman sebesar 192% dibandingkan kontrol (D0) dan sebanding dengan pemupukan anorganik standar (D1).

Asupan unsur hara makro seperti N, P, dan K menjadi faktor utama optimasi peningkatan produksi. Hal ini senada dengan hasil penelitian Abdisa et al. (2022) bahwa produksi tertinggi biji gandum diperoleh dari hasil kombinasi pemupukan nitrogen, fosfor, sulfur, dan boron (200 kg NPSB/ha) yang ditambah dengan 112,2 kg N/ha. Nurani et al. (2020) juga memaparkan bahwa pemberian pupuk anorganik dasar NPK yang dilengkapi dengan pupuk borate pada waktu 7 HST dapat mempercepat pembentukan bunga dan berat biji polong kacang hijau. Saquee et al. (2023) juga menyatakan bahwa aplikasi pupuk mikro pada gandum berdampak pada peningkatan kadar protein biji-bijian sekaligus konsentrasi unsur hara tersebut dalam biji-bijian. Berdasarkan penelitian tersebut semakin banyak bukti yang mengangkat bahwa penggunaan pupuk mikro borate yang dikombinasikan dengan pupuk makro dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, sifat fisiologis, komponen hasil, dan kualitas biji-bijian secara signifikan.

Serapan hara Boron tanaman jagung manis dan efisiensi pemupukan

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa aplikasi pupuk mikro borate dan pupuk anorganik makro standar (Urea, SP-36, dan KCl) berpengaruh sangat nyata terhadap serapan B tanaman, *boron efficiency recovery (BRE)*, dan rasio efisiensi serapan B di lahan kering pada daerah tropis ($P < 0,01$) (Tabel 6). Berkebalikan dengan produksi tanaman, semakin tinggi dosis boron yang diaplikasikan, maka ditemukan kadar boron pada yang semakin tinggi pada biomassa tanaman. Pemberian pupuk boron 150% (~9 kg/ha) yang dikombinasi dengan pupuk anorganik 100%

meningkatkan serapan boron 485% lebih tinggi dibandingkan kontrol (D1). Aplikasi pupuk anorganik 100% dan pupuk borate 100% (~6 kg/ha) juga turut memberikan peningkatan serapan hara yang signifikan, dibandingkan perlakuan lainnya. Menariknya, pengurangan dosis pupuk anorganik NPK menjadi 75% dosis (D5-D7) akan diikuti dengan penurunan serapan boron. Di sisi lain, aplikasi pupuk mikro borate dengan dosis terlalu tinggi (150%; ~9 kg/ha) akan diikuti dengan penurunan serapan boron.

Pemberian pupuk anorganik makro NPK dan pupuk borat secara signifikan ($p < 0,05$) meningkatkan BRE dan rasio efisiensi serapan B pada tanaman jagung manis dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Perlakuan D3 (100% pupuk anorganik + 100% borat) menghasilkan efisiensi pemulihan boron tertinggi sebesar 138,1% dengan serapan boron mencapai 0,65 mg/tanaman. Pemupukan anorganik makro 100% secara umum menghasilkan BRE lebih tinggi, di atas 100%. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi boron pada dosis NPK optimal mampu memaksimalkan penyerapan boron oleh tanaman. Menurunnya dosis pupuk NPK diikuti dengan penurunan BRE dengan kisaran 59–90%. Efisiensi pemulihan yang lebih rendah ditemukan pada perlakuan D7 (75% pupuk anorganik + 150% borat), yakni 59,1%, mengindikasikan bahwa kelebihan boron tidak dapat dimanfaatkan secara efektif.

Rasio efisiensi serapan B tertinggi juga tercatat pada perlakuan D3 dengan nilai 1,45. Hal ini menunjukkan bahwa pada kombinasi 100% pupuk anorganik dan 100% borat, tanaman mampu menyerap dan memanfaatkan boron dengan efisien untuk mendukung proses fisiologisnya. Rasio efisiensi serapan yang lebih rendah pada perlakuan D7 (75% pupuk anorganik + 150% borat) sebesar 0,63 menunjukkan bahwa peningkatan dosis boron tidak selalu diikuti oleh peningkatan serapan, yang dapat disebabkan oleh interaksi antagonis dengan unsur hara lainnya atau toksisitas boron. Rasio efisiensi serapan boron yang optimal memerlukan keseimbangan antara dosis boron yang diberikan dan kondisi lingkungan tanah untuk menghindari kehilangan boron akibat pencucian karena boron tidak terikat pada tanah (Brdar-Jokanović, 2020).

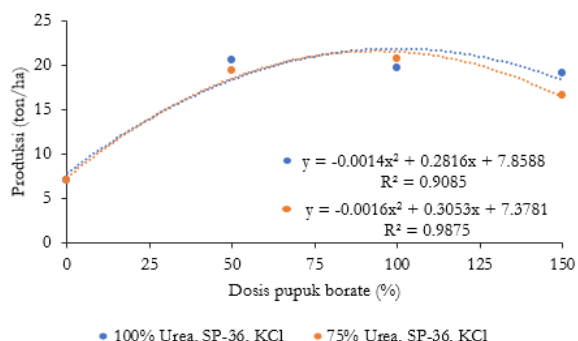
Tabel 6. Serapan hara tanaman jagung dan pengukuran efisiensi pemupukan pasca pemupukan boron.

Kode	Perlakuan	Serapan Boron (mg/tanaman)	Boron recovery efficiency (%)	Efisiensi Serapan B
D0	Kontrol	0.03e	0d	0d
D1	100% Pupuk Anorganik	0.14de	0d	0d
D2	100% Pupuk Anorganik + 50% borate	0.24d	92.8bc	1abc
D3	100% Pupuk Anorganik + 100% borate	0.65b	138.1a	1.45a
D4	100% Pupuk Anorganik + 150% borate	0.85a	121.4ab	1.25ab
D5	75% Pupuk Anorganik + 50% borate	0.21d	80.8bc	0.94bc
D6	75% Pupuk Anorganik + 100% borate	0.43c	90bc	0.96bc
D7	75% Pupuk Anorganik + 150% borate	0.43c	59.1c	0.63c
f prob		$9,18 \times 10^{-7***}$	$2,78 \times 10^{-5***}$	$1,34 \times 10^{-5***}$

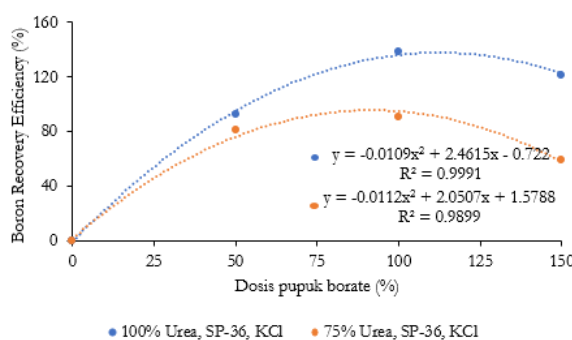
Keterangan: Nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan. Rata-rata yang diikuti oleh huruf yang berbeda berbeda secara signifikan pada $p \leq 0,05$ dengan uji lanjut Duncan

Hubungan antara pemupukan B terhadap produksi tanaman dan serapan B

Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa peningkatan dosis pupuk hara mikro borate tidak meningkatkan produksi jagung manis apabila dalam dosis yang berlebihan (Gambar 1a). Hasil produksi jagung dengan perlakuan pupuk anorganik makro standar (Urea, SP-36, dan KCl) berdosisi 100% dan pupuk borate (50–100%) dapat diestimasi dari kurva respons dengan persamaan $y = -0,0014x^2 + 0,2816x + 7,8588$ dengan $R^2 = 0,9085$. Berdasarkan persamaan kuadratik tersebut, produksi jagung maksimum sejumlah 22 ton/ha jagung manis dapat diperoleh dengan pemupukan 100% dosis (6 kg Borate/ha), sedangkan produksi optimum (95% dari maksimum) sejumlah 21 ton/ha didapatkan dengan pemupukan borate sejumlah 5,7 kg pupuk borate. aplikasi pupuk anorganik makro 100% dapat dikombinasikan dengan pupuk borate 5.7 – 6 kg/ha untuk mencapai rentang produksi jagung manis optimum hingga maksimum (21-22ton/ha).



Gambar 1. Pengaruh aplikasi pupuk boron dan pupuk anorganik 100% dan 75% terhadap produksi jagung manis.



Gambar 2. Pengaruh aplikasi pupuk boron dan pupuk anorganik 100% dan 75% terhadap boron recovery efficiency.

Berdasarkan hasil regresi aplikasi pupuk anorganik 75% dan pupuk borate berlebih akan diikuti penurunan produksi tanaman jagung manis, dengan persamaan $y = -0,0016x^2 + 0,3053x + 7,3781$ dengan $R^2 = 0,9875$. Titik maksimum produksi jagung manis sebesar 21,94 ton/ha diperoleh dari turunan kurva tersebut dengan aplikasi pupuk anorganik makro (75%) dan pupuk borate 95,41% (setara 5,72 kg/ha). Produksi optimum sebesar 20,84 ton/ha jagung manis (5% lebih rendah dari produksi maksimum) dapat dicapai dengan kombinasi pupuk anorganik makro 75% dengan pemupukan borate sebesar 4,14 kg/ha. Berdasarkan persamaan tersebut, dosis rekomendasi untuk mencapai produksi jagung manis secara optimum-maksimum adalah pemupukan anorganik makro 75% yang dikombinasikan dengan pupuk borate 4,14 – 5,72 kg/ha. Penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa aplikasi pupuk boron lebih dari 6 kg/ha pada tanaman jagung manis akan diikuti dengan penurunan produksi. Hal ini juga dibuktikan dari penelitian aplikasi boron pada kelapa sawit (Prasetyanto et al., 2024). Penelitian tersebut

mengungkapkan bahwa pemupukan boron yang terlalu tinggi akan berdampak pada penurunan produksi tandan buah segar kelapa sawit. Pemberian 100 gram/tanaman pupuk boron pada tanaman kelapa sawit diikuti dengan penurunan produksi, sesuai pada kurva kuadrat. Dosis optimal pada tanaman kelapa sawit diperoleh pada 67,95 gram boron/tanaman. Meski begitu, penurunan dosis NPK juga turut menurunkan produksi tanaman dan serapan B tanaman.

Gambar 2 menggambarkan bahwa hasil regresi *boron recovery efficiency* (BRE) menunjukkan tren yang sama dengan produksi jagung manis. Pupuk boron yang diaplikasikan secara berlebih akan diikuti dengan penurunan BRE. Estimasi BRE maksimum dari kombinasi pupuk anorganik makro standar dosis 100% dan pupuk mikro borat dapat diestimasi melalui persamaan $y = -0.0109x^2 + 2.4615x - 0.722$ dengan $R^2 = 0,9991$. Turunan persamaan kurva respons menunjukkan pemberian dengan 100% pupuk anorganik makro yang dikombinasikan 6,75 kg borate per hektar akan didapatkan efisiensi boron maksimum sebesar 138,68%. Penurunan dosis pupuk anorganik makro sebesar 25% di sisi lain juga dapat meningkatkan BRE hingga mencapai 95,45% apabila dikombinasikan dengan 5,49 kg pupuk borate per hektar, persamaan regresi $y = -0,0112x^2 + 2,0507x + 1,5788$; $R^2 = 0,9899$. Upaya penurunan dosis pupuk anorganik makro dapat dijalankan dengan mengoptimasi pemupukan boron.

Kesimpulan

1. Aplikasi pupuk borate secara signifikan mampu meningkatkan pertumbuhan, biomassa tanaman, serapan B, *boron recovery efficiency*, dan rasio efisiensi pemupukan B dengan pemupukan anorganik makro 100% (urea, SP-36, KCl) dan penambahan pupuk borate dosis 50-100% (~3-6 kg/ha)
2. Dosis rekomendasi untuk mencapai produksi jagung manis secara optimum-maksimum dan *boron recovery efficiency* maksimum adalah pemupukan anorganik makro 100% (urea, SP-36, dan KCl) yang dikombinasi dengan pupuk borate 5,72 – 6,75 kg/ha.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Dunia Kimia Jaya atas dukungan yang diberikan selama penelitian ini. Bantuan berupa pendanaan dan penulisan bersama telah memungkinkan penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Dukungan ini sangat berarti

bagi pengembangan studi dan hasil yang dicapai. Penulis juga berterima kasih kepada Departemen Tanah atas fasilitas laboratorium dan kerja sama yang sangat berharga.

Daftar Pustaka

- Abdisa Jalata, D., Gobena Roro, A., Hunduma Dabalo, A., Asefa Bebayehu, F., & Woticha, A. T. (2022). Effect of Blended NPSB and Nitrogen Application rates on Growth, Yield, and Yield Components of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) at Gitilo Dale Research Site of Wallaga University, Western Ethiopia. *Advances in Agriculture*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1706039>
- Amanullah, Iqbal, A., Irfanullah, & Hidayat, Z. (2016). Potassium Management for Improving Growth and Grain Yield of Maize (*Zea mays* L.) under Moisture Stress Condition. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep34627>
- Aziiba, E. A., Qiang, C., & Coulter, J. A. (2019). Mechanisms of nitrogen use in maize. In *Agronomy* (Vol. 9, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120775>
- Brdar-Jokanović, M. (2020). Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 21, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms21041424>
- Das, R., Mandal, B., Sarkar, D., Pradhan, A. K., Datta, A., Padhan, D., Seth, A., Kumar, R., De, N., Mishra, V. N., Polara, K. B., Sharma, S., Thakur, N. P., Kachroo, D., Ray, M., Sharma, A., Patel, K. P., Garnayak, L. M., & Narkhede, W. N. (2019). Boron availability in soils and its nutrition of crops under long-term fertility experiments in India. *Geoderma*, 351, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.022>
- Dobermann, A. (2007). *Nutrient use efficiency—measurement and management*. In: Krauss, A., Isberwood, K., Heffer, P. (Eds.), *Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for Their Adoption and Voluntary Initiatives Versus Regulations*. International Fertilizer Industry Association.
- Fujiyama, B. S., Silva, A. R. B. e., Silva Júnior, M. L. da, Cardoso, N. R. P., Fonseca, A. B. da, Viana, R. G., & Sampaio, L. S. (2019). Boron fertilization enhances photosynthesis and water use efficiency in soybean at vegetative growth stage. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), 2498–2506. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659326>
- Good, A. G., Shrawat, A. K., & Muench, D. G. (2004). Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? In *Trends in Plant Science* (Vol. 9,

- Issue 12, pp. 597–605).
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.10.008>
- Gracia, J. M., Elayaraja, D., Kamalakannan, P., & Kamaleshwaran, R. (2024). Effect of Boron Fertilization and Boron Enriched Organic Manures on Yield Boron Use Efficiency and Nutrient Uptake by Tomato in Coastal Soil. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(6), 50–61.
<https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i64605>
- Halder, A., Poddar, R., Dey, A., Kundu, R., & Patra, S. K. (2022). Frequency of Irrigation and Boron on Growth, Yield, Water Use Efficiency and Economics of Summer Green Gram in Humid Sub-Tropical Climate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(2), 180–198.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1984514>
- Hayat, H. S., Rehman, A. ur, Farooq, S., Naveed, M., Ali, H. M., & Hussain, M. (2023). Boron seed coating combined with seed inoculation with boron tolerant bacteria (*Bacillus* sp. MN-54) and maize stalk biochar improved growth and productivity of maize (*Zea mays* L.) on saline soil. *Heliyon*, 9(11).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22075>
- Hu, W., Gu, H., Wang, K., Lu, Z., Li, X., Cong, R., Ren, T., & Lu, J. (2023). Potassium deficiency stress reduces Rubisco activity in Brassica napus leaves by subcellular acidification decreasing photosynthetic rate. *Plant Physiology and Biochemistry*, 201, 107912.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107912>
- Nsouli, B., Darwish, T., Zahraman, K., Bejjani, A., Roumié, M., & Thomas, J. P. (2006). Total boron assessment in soil samples from dry Mediterranean region using the thick target-particle induced gamma-ray emission technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 249(1-2 SPEC. ISS.), 566–570.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2006.03.056>
- Nugroho, G. A., Novalia Kusumarini, Wachidiyah Romadhoni, & Syahrul Kurniawan. (2024). Effect of Micronutrient Fertilization on Production and Soil Fertility in Maize. *Jurnal Pertanian Tropik*, 10(3), 30–40. <https://doi.org/10.32734/jpt.v10i3.14388>
- Nurani, K. C., Budiyananto, S., & Purbajanti, E. D. (2020). Dosis dan Waktu Aplikasi Boron Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Kacang Hijau. *Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi*, 22(2), 64.
<https://doi.org/10.20961/agsjpa.v22i2.42058>
- Power, P. P., & Woods, W. G. (1997). The chemistry of boron and its speciation in plants. In *Plant and Soil* (Vol. 193). Kluwer Academic Publishers.
- Prasetyanto, L. P., Putra, E. T. S., & Hanudin, E. (2024). Physiological responses, growth and productivity of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) as affected by boron fertilization. *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)*, 9(2), 94.
<https://doi.org/10.22146/ipas.86073>
- Ramirez-Builes, V. H., Küsters, J., Thiele, E., & Leal-Varon, L. A. (2024). Boron Nutrition in Coffee Improves Drought Stress Resistance and, Together with Calcium, Improves Long-Term Productivity and Seed Composition. *Agronomy*, 14(3).
<https://doi.org/10.3390/agronomy14030474>
- Roth, G., Beegle, D., Heinbaugh, S., & Antle, M. (2006). Starter Fertilizers for Corn on Soils Testing High in Phosphorus in the Northeastern USA. *Agronomy Journal - AGRON J*, 98.
<https://doi.org/10.2134/agronj2005.0220>
- Saquee, F. S., Diakite, S., Kavhiza, N. J., Pakina, E., & Zargar, M. (2023). The Efficacy of Micronutrient Fertilizers on the Yield Formulation and Quality of Wheat Grains. In *Agronomy* (Vol. 13, Issue 2). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13020566>
- Sarkar, D., Mandal, B., & Kundu, M. C. (2007). Increasing use efficiency of boron fertilisers by rescheduling the time and methods of application for crops in India. *Plant and Soil*, 301(1–2), 77–85.
<https://doi.org/10.1007/s11104-007-9423-1>
- Schulze, E.-D., Beck, E., Buchmann, N., Clemens, S., Müller-Hohenstein, K., & Scherer-Lorenzen, M. (2019). *Plant Ecology* (Second edition). Springer.
- Teeter-Wood, K. R., Flaherty, E. J., Donetz, A. J., Hoover, G. J., MacDonald, W. N., Wolyn, D. J., & Shelp, B. J. (2023). Improving Boron and Molybdenum Use Efficiencies in Contrasting Cultivars of Subirrigated Greenhouse-Grown Pot Chrysanthemums. *Plants*, 12(12).
<https://doi.org/10.3390/plants12122348>