



Budidaya Sistem Vertikultur dengan Fertigasi: Kajian Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Selada Melalui Modifikasi Media Tanam dan Boron

Verticulture Cultivation System with Fertigation: A Study of Lettuce Growth and Yield Through Modification of Planting Media and Boron

Wilda Lumban Tobing^{1*}, Gloriana Getreda Maunino¹, Risna Erni Yati Adu², Azor Yulianus Tefa¹,
Natalia Desy Djata Ndua¹

¹Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Universitas Timor, Timor Tengah Utara, Indonesia

²Departement of Chemistry, Faculty of Agriculture, Universitas Timor, Timor Tengah Utara, Indonesia

*Corresponding author: wiladatob14@gmail.com

Received: July 8, 2025; Accepted: September 25, 2025; Published: October 31, 2025

ABSTRAK

Tanah pada lahan kering memiliki kualitas fisik yang rendah sehingga memerlukan pengelolaan yang cukup berat untuk dapat digunakan sebagai media tanam. Penggunaan vertikultur ditujukan untuk memodifikasi media tanam dengan menggunakan biochar dan kompos. Pengembangan vertikultur dengan sistem fertigasi sebagai metode penyediaan air dan unsur hara secara merata di sepanjang pipa vertikultur. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh komposisi media tanam dan konsentrasi boron terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman selada pada sistem fertigasi vertikultur. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan rancangan petak terbagi. Petak utama adalah komposisi media tanam yang terdiri dari: tanah (kontrol), 50% tanah: kompos + 50% biochar, dan 75% tanah media tanam: kompos + 25% biochar; dan 25% tanah media tanam: kompos + 75% biochar. Anak petak adalah konsentrasi Boron yang terdiri dari: tanpa boron; boron 1 g/L, dan boron 1,5 g/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa interaksi antara media tanam dan konsentrasi berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman, jumlah daun 21-28 HST, serta volume akar. Media tanam berpengaruh nyata terhadap semua pengamatan. Konsentrasi boron berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman pada umur 35 HST. Kombinasi media tanam dengan proporsi kompos dan biochar yang seimbang, beserta konsentrasi boron yang optimal, meningkatkan pertumbuhan selada pada fertigasi sumbu vertikal.

Kata kunci: boron; fertigasi; media tanam; selada; vertikultur

ABSTRACT

Dry land soils generally have poor physical quality, requiring intensive management to be used effectively as planting media. Verticulture is applied to improve the growing medium by incorporating biochar and compost. The development of verticulture integrated with a fertigation system allows uniform distribution of water and nutrients along the vertical pipes. This study aimed to examine the effects of planting medium composition and boron concentration on the growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under a verticulture fertigation system. The experiment employed a split-plot design. The main plot consisted of different planting medium compositions: soil (control), 50% soil + 50% compost–biochar mixture, 75% soil + 25% compost–biochar mixture, and 25% soil + 75% compost–biochar mixture. The subplot was the boron concentration, consisting of 0 g/L (control), 1 g/L, and 1.5 g/L. The results showed that the interaction between planting medium composition and boron concentration significantly affected plant height and number of leaves at 21–28 days after planting (DAP), as well as root volume. The planting medium had a significant effect on all observed parameters, while boron concentration significantly affected plant height at 35 DAP. The combination of compost and biochar in balanced proportions, together with optimal boron concentration, enhanced lettuce growth performance in the vertical wick fertigation system.

Keywords: boron; fertigation; growing media; lettuce; verticulture

Cite this as: Tobing, W. L., Maunino, G. G., Adu, R. E. Y., Tefa, A. Y., & Ndua, N. D. D. (2025). Budidaya Sistem Vertikultur dengan Fertigasi: Kajian Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Selada Melalui Modifikasi Media Tanam dan Boron. *Agrosains : Jurnal Penelitian Agronomi*, 27(2), 66-74. DOI: <http://dx.doi.org/10.20961/agsjpa.v27i2.107345>

PENDAHULUAN

Budidaya menggunakan sistem vertikultur berkembang sesuai tantangannya. Budidaya sistem ini memanfaatkan sayur-sayuran seperti selada (*Lactuca sativa* L.). Sayur ini memiliki nilai ekonomis yang sangat tinggi (Yustiana et al., 2025). Melalui vertikultur, produksi selada dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan lahan-lahan marginal seperti lahan kering. Namun, lahan kering memiliki beberapa kendala untuk dijadikan sebagai media tanam tanaman karena solumnya yang tipis, kandungan bahan dan C-organik yang rendah, agregat tanah yang kurang baik, dan cenderung alkalis. Hal ini diakibatkan kondisi biofisiknya berbukit dan berlereng sehingga peka terhadap fenomena kerusakan lahan terutama akibat erosi dan kandungan hara utama (N) yang relatif rendah, keterbatasan ketersediaan sumber daya air sebagai salah satu faktor rendahnya produktivitas lahan (Matheus et al., 2017). Melalui vertikultur, media tanam dapat dimodifikasi menggunakan bahan-bahan organik untuk meningkatkan media tumbuh tanaman dari lahan kering. Penggunaan tanah sebagai media tanam dari lahan kering membutuhkan perbaikan. Hal ini karena media tanam adalah tempat tumbuhnya akar tanaman yang berperan dalam mengambil makanan berupa unsur hara untuk menunjang pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Solikhah et al., 2020). Media yang mampu menyediakan hara bagi tanaman dan kondisi fisik yang dapat mendukung perkembangan akar tanaman merupakan media tumbuh yang baik bagi tanaman (Neonbeni et al., 2022). Beberapa jenis media yang banyak digunakan sebagai media tanam dalam budidaya vertikultur adalah sekam bakar, pupuk kandang dan lain-lain (Izhar et al., 2016). Perbaikan kualitas media tanam dapat dilakukan dengan pemberian bahan pembenah tanah seperti kompos dan biochar (Hanim et al., 2021). Penggunaan amelioran organik seperti kompos secara konsisten mampu meningkatkan keanekaragaman mikroba, mengubah struktur komunitas mikroba, serta memperkuat fungsi ekologi tanah dan produktivitas tanaman (Shu et al., 2022). Pada umumnya unsur-unsur hara yang terdapat pada kompos yaitu kandungan C-organik, nitrogen (N), fosfor (P) dan kalium (K) (Syafria & Farizaldi, 2022). Selain kompos, penggunaan biochar dapat dijadikan bahan pembenah tanah. Pemberian kompos 70% memungkinkan penggantian lebih dari setengah total penggunaan pupuk pada sayuran berdaun hijau (Mu et al., 2020). Sedangkan penggunaan biochar sebagai pembenah bagi tanah mampu memperbaiki sifat tanah seperti meningkatkan stabilitas agregat tanah, meningkatkan permeabilitas, memperbaiki aerasi tanah, meningkatkan kandungan C-organik tanah, mampu meretensi hara dan air agar tersedia untuk tanaman (Gunarathne et al., 2017). Biochar efektif untuk meningkatkan kandungan N anorganik tanah dan hasil tanaman dalam sistem rotasi jagung-sawi putih (Zhao et al., 2022). Penggunaan kompos dengan biochar bersamaan signifikan mempengaruhi struktur komunitas bakteri dan mempercepat mineralisasi karbon organik (Shiu et al., 2022). Aplikasi keduanya juga mampu meningkatkan nutrisi dan kualitas buah paprika (EL-Mogy et al., 2024).

Penggunaan vertikultur di lahan kering sebagai inovasi yang berkembang. Vertikultur mulai

dikembangkan dengan sistem fertigasi. Melalui fertigasi, pemupukan dan air bisa diberi dalam bentuk larutan dan mengurangi laju penguapan yang tinggi akibat panas (Tobing et al., 2024; Naisaban et al., 2024). Sistem ini juga mampu meningkatkan serapan hara nitrogen tanaman pakcoy sebesar 50,67 dan posfor 18,1 dengan efisiensi penyerapan nitrogen sebesar 53,6 dan posfor 18,78 (Tobing, Neonbeni, et al., 2022). Melalui sistem fertigasi, peningkatan tanaman pakcoy juga dapat ditingkatkan dari melalui pupuk Boron (B). Boron berperan penting dalam integritas struktural dan fungsional dinding sel dan membran sel, pembelahan dan pemanjangan sel, metabolisme nitrogen dan karbohidrat (Shireen et al., 2018). Defisiensi B menunjukkan perubahan morfologi akar yang mengakibatkan peningkatan rasio tajuk/akar, penebalan massa dinding sel akar yang menghambat total penyerapan dan pengangkutan nutrisi (García-Sánchez et al., 2020). Selain itu, ditemukan penurunan kadar enzim antioksidan, akumulasi ROS, nilai laju fotosintesis, efek negatif pada efisiensi fotosistem II, laju transpirasi, konduktansi stomata, pertukaran gas daun, dan CO₂ antarsel (García-Sánchez et al., 2020; Wimmer & Eichert, 2013). Penggunaan B dapat meningkatkan hasil produksi tanaman dan mampu meningkatkan tingkat penyerapan hara oleh tanaman (Darsana et al., 2014). Penggunaan kompos pada media tanam dan pemupukan B memberikan hasil terbaik pada pertumbuhan buah bit (Seadh et al., 2021). Pemupukan boron dengan adanya biochar Azolla menghasilkan protein gabah tertinggi sebesar 33,87% pada kacang tanah (Ghazimahalleh et al., 2022). Namun belum ada kajian modifikasi media tanam dengan penambahan boron pada tanaman selada yang memanfaatkan tanah dari lahan kering. Oleh karena itu, penelitian mempunyai tujuan untuk mengkaji pengaruh komposisi media tanam dan konsentrasi boron pada pertumbuhan dan hasil tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) budidaya vertikultur sistem fertigasi.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini telah dilakukan pada Mei-Juli 2025 di Keluarahan Sasi, Kecamatan Kota Kefamenanu, Timor Tengah Utara, Nusa Tenggara Timur. Metode penelitian menggunakan eksperimental dengan Rancangan Petak Terpisah (*Split-Plot*) dengan 2 faktor. Petak utama adalah komposisi media tanam yang terdiri atas: tanah (M0); media tanam tanah 50% : kompos + biochar 50% (M1); dan media tanam tanah 75 % : kompos + biochar 25 % (M3); dan media tanam tanah 25 % : kompos + biochar 75 % (M4). Anak petak adalah konsentrasi Boron yang terdiri dari: tanpa Boron (B0); Boron 1 g/L (B1); dan Boron 1,5 g/L (B2). Sebanyak 12 kombinasi perlakuan yaitu: M0B0, M0B1, M0B2, M1B0, M1B1, M1B2, M2B0, M2B1, M2B2, M3B0, M3B1, dan M3B2. Semua perlakuan ini diulang sebanyak 3 kali diperoleh 36 total kombinasi perlakuan.

Prosedur penelitian ini terdiri dari:

1. **Persiapan lahan**, dibersihkan lahan penelitian dari gulma dan sampah yang menjadi sumber hama dan penyakit. Dibangun rumah penelitian ukuran 4 x 6 m yang ditutup dengan bambu dan paranet .
2. **Perancangan vertikultur dengan sistem fertigasi**, dipotong paralon 4" sepanjang 1,33 m. Dibuat lubang

tanam setiap pipa sebanyak 15 dimana antar lubang tidak sejajar. Pembuatan lubang tanam menggunakan gerinda dan *heatgun*. Fertigasi dibuat dari paralon 0,5" sepanjang 150 cm dan diberi lubang sepanjang pipa menggunakan *solder*.

3. **Pengisian dan pemadatan media tanam**, pengisian media disesuaikan dengan perlakuan penelitian. Dilakukan selama 1 minggu sebelum tanam.
4. **Penanaman**, dilakukan langsung menanam benih selada pada setiap media tanam, terdapat 15 tanaman setiap pipa vertikultur.
5. **Pemeliharaan**, terdiri dari penyiraman dan pemupukan. Penyiraman dilakukan 2 kali sehari dengan volume 1 L/pipa/15 tanaman. Pemupukan disesuaikan dengan perlakuan penelitian. Pengaplikasian pupuk sebanyak 3 kali dengan frekuensi 1 minggu sekali yaitu 14 HST, 21 HST, dan 28 HST.
6. **Pemanenan**, dilakukan pada umur 35 HST dengan mencabut tanaman sampai ke akar kemudian dipisah antara tajuk dan akar untuk dilakukan pengukuran berikutnya.
Pengamatan penelitian terdiri dari:
 1. **Tinggi tanaman**, dilakukan dengan mengukur tinggi tanaman dari pangkal tanaman sampai titik tumbuh setiap 1 minggu sekali pada umur 14 HST, 21 HST, 28 HST, dan 35 HST.
 2. **Jumlah daun**, dilakukan dengan menghitung jumlah daun setiap 1 minggu sekali pada umur 14 HST, 21 HST, 28 HST, dan 35 HST.
 3. **Bobot segar tajuk**, dilakukan dengan menimbang tajuk selada sebagai bobot segar pada akhir penelitian (35 HST).
 4. **Volume akar**, dilakukan dengan menghitung volume akar menggunakan gelas ukur 10 mL dengan cara membandingkan pertambahan volume air di dalam

gelas ukur. Selisihnya sebagai hasil dari volume akar. Dilakukan pada akhir penelitian (35 HST).

Analisis data menggunakan data sidik ragam dengan uji lanjut *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) dengan tingkat 5 α %.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinggi Tanaman

Berdasarkan data sidik ragam dapat dilihat bahwa interaksi antara komposisi media tanam dengan konsentrasi boron berpengaruh nyata terhadap parameter tinggi tanaman pada umur 21 - 28 HST. Pada 21 HST, kombinasi perlakuan M1B0, M2B0, M2B2, dan M3B1 tidak berbeda nyata dengan M1B1, M1B2, dan M2B1 namun berbeda nyata dengan kombinasi perlakuan lainnya (Tabel 1). Pada 28 HST, kombinasi perlakuan M3B1 tidak berbeda nyata dengan M1B0, M1B1, M1B2, M2B0 dan M2B2, namun berbeda nyata dengan kombinasi perlakuan lainnya. Perlakuan tunggal komposisi media tanam berpengaruh nyata pada umur 14 - 35 HST. Pada 14 HST, M1, M2, dan M3 berbeda nyata dengan M0. Pada 21 - 35 HST, M1 dan M2 berbeda nyata dengan M0 dan M3. Perlakuan konsentrasi boron berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman pada umur 35 HST dimana B1 berbeda nyata dengan B0 dan B2.

Interaksi antara komposisi media tanam dan konsentrasi boron memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter tinggi tanaman selada dalam budidaya vertikultur sistem fertigasi, terutama pada usia 21 - 28 HST. Kombinasi perlakuan tertentu menunjukkan kemampuan media tanam yang diperkaya bahan organik dan boron untuk mendukung pertumbuhan vegetatif secara maksimal. Pada usia 21 HST, kombinasi perlakuan seperti M2B0 dan M3B1

Tabel 1. Rataan Tinggi Tanaman (cm)

Umur	Perlakuan	B0	B1	B2	Rata-rata
14 HST	M0	1,50 $\pm$ 0,12	1,60 $\pm$ 0,21	1,83 $\pm$ 0,09	1,64b $\pm$ 0,14
	M1	2,10 $\pm$ 0,06	2,33 $\pm$ 0,00	2,17 $\pm$ 0,01	2,20a $\pm$ 0,02
	M2	2,57 $\pm$ 0,19	2,50 $\pm$ 0,05	2,50 $\pm$ 0,10	2,52a $\pm$ 0,12
	M3	1,43 $\pm$ 0,13	2,83 $\pm$ 0,15	2,07 $\pm$ 0,02	2,11a $\pm$ 0,00
	Rata-rata	1,90 $\pm$ 0,06	2,32 $\pm$ 0,06	2,14 $\pm$ 0,01	
21 HST	M0	3,33 d $\pm$ 1,06	4,07 cd $\pm$ 1,01	3,50 d $\pm$ 0,73	3,63 c $\pm$ 0,93
	M1	9,00 a $\pm$ 0,58	8,17 ab $\pm$ 0,18	7,93 ab $\pm$ 0,55	8,37 a $\pm$ 0,43
	M2	11,00 a $\pm$ 1,15	7,33 abc $\pm$ 0,06	9,33 a $\pm$ 0,96	9,22 a $\pm$ 0,68
	M3	4,67 bcd $\pm$ 0,67	10,67 a $\pm$ 0,90	3,33 d $\pm$ 0,78	6,22 b $\pm$ 0,18
	Rata-rata	7,00 $\pm$ 0,04	7,56 $\pm$ 0,20	6,03 $\pm$ 0,24	
28 HST	M0	5,67 d $\pm$ 2,17	5,33 d $\pm$ 2,93	5,50 d $\pm$ 1,96	5,50 c $\pm$ 2,35
	M1	17,00 ab $\pm$ 1,11	19,33 ab $\pm$ 1,11	18,33 ab $\pm$ 1,74	18,22 a $\pm$ 1,32
	M2	19,33 ab $\pm$ 1,78	15,33 bc $\pm$ 0,05	19,00 ab $\pm$ 1,94	17,89 a $\pm$ 1,22
	M3	10,67 cd $\pm$ 0,72	22,00 a $\pm$ 1,88	6,33 d $\pm$ 1,72	13,00 b $\pm$ 0,19
	Rata-rata	13,17 $\pm$ 0,14	15,50 $\pm$ 0,53	12,29 $\pm$ 0,39	
35 HST	M0	7,33 $\pm$ 3,37	7,67 $\pm$ 4,81	8,00 $\pm$ 3,03	7,67 c $\pm$ 3,74
	M1	25,00 $\pm$ 1,73	32,00 $\pm$ 2,21	31,00 $\pm$ 3,61	29,33 a $\pm$ 2,52
	M2	28,33 $\pm$ 2,69	27,33 $\pm$ 0,87	24,00 $\pm$ 1,59	26,56 a $\pm$ 1,72
	M3	15,33 $\pm$ 1,06	30,33 $\pm$ 1,73	11,00 $\pm$ 2,17	18,89 b $\pm$ 0,50
	Rata-rata	19,00b $\pm$ 0,47	24,33a $\pm$ 1,07	18,50b $\pm$ 0,61	

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan hasil yang berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada tingkat (α) 5%.

menghasilkan tinggi tanaman tertinggi, masing-masing sebesar 11,00 cm dan 10,67 cm. Hasil ini menonjol dibandingkan kombinasi lainnya dan menunjukkan bahwa kandungan bahan organik dalam media tanam berperan penting dalam menyediakan nutrisi yang sesuai kebutuhan tanaman selada. Pada usia 28 HST, kombinasi perlakuan M3B1 juga memberikan hasil dengan rata-rata tinggi tanaman sebesar 22,00 cm. Pada media tanam dengan proporsi kompos+biochar yang besar, banyak boron yang terikat (adsorpsi fisik dan kimia) sehingga ketersediaan boron bebas dalam larutan media menjadi terbatas untuk tanaman. Interaksi kimia antara boron dan biochar menunjukkan bahwa biochar dapat mengikat boron secara permanen yang mempengaruhi kinerja pelepasan boron ke dalam larutan media (Chisté et al., 2024). Kondisi ini yang mengakibatkan kinerja M3B2 sama dengan M2B0 dimana pupuk boron yang ditambahkan tidak langsung meningkatkan konsentrasi boron yang dapat diserap akar akibat ikatan boron dengan biochar. Suatu penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase kompos dalam media tanam maka konsentrasi boron dalam larutan tanah menurun secara signifikan sehingga penyerapan boron oleh tanaman juga menurun (Yermiyahu et al., 2001).

Pengaruh komposisi media tanam umur 14 HST, media tanam M1, M2, dan M3 menunjukkan tinggi tanaman yang berbeda nyata dibandingkan dengan M0, dengan rata-rata tertinggi pada M2 sebesar 2,52 cm. Pada 21 HST, kombinasi perlakuan M1 dan M2 menunjukkan hasil tertinggi, yaitu 8,37 cm dan 9,22 cm. Perlakuan tunggal M1 dan M2 tetap menunjukkan hasil yang baik, dengan rata-rata tinggi tanaman mencapai 18,22 cm dan 17,89 cm. Pengaruh positif ini berlanjut hingga 35 HST, dimana perlakuan M1 dan M2 kembali memberikan hasil tertinggi masing-masing 29,33 cm dan 26,56 cm. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan kompos + biochar pada perbandingan yang tepat mampu meningkatkan kualitas media melalui peningkatan kapasitas retensi air dan penyediaan nutrisi. Penggunaan kompos dan biochar mampu memperbaiki sifat tanah di lahan kering dan mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman pakcoy yang dibudidayakan secara vertikutur dengan sistem fertigasi (Tobing et al., 2024a; 2024b). Namun penggunaan yang tidak sesuai kebutuhan dapat menurunkan laju pertumbuhan tinggi tanaman selada yang dapat dilihat dari umur 21-35 HST. Biochar dan kompos yang baru diproduksi diduga mengandung organik volatil yang pada jumlah sedikit dapat merangsang pertumbuhan awal seperti perpanjangan tunas dan akar, tetapi pada jumlah yang besar pada umur 21-25 HST diduga menyebabkan efek toksik yang menghambat pertumbuhan. Pada umur 14 HST, tanaman memungkinkan merespon efek hormetik dari senyawa-senyawa tersebut. Ketepatan jumlah kompos+biochar di dalam media tanam mempengaruhi tinggi tanaman selada secara signifikan pada umur 21-35 HST. Perbandingan 50%;50% dan 25%;75 % menjadi jumlah yang optimal pada pertumbuhan tinggi tanaman selada. Hal ini diduga adanya keseimbangan nutrisi dan struktur media seperti porositas dan retensi air yang lebih baik dibandingkan M0 dan M3. Pasokan nutrisi dan peran mikroorganisme membantu mineralisasi dan penyediaan hara sehingga membantu

menyeimbangkan siklus nutrisi. Pada perlakuan M0, media cenderung memiliki struktur tanah yang kurang baik karena rendahnya kandungan bahan organik dan mikroba yang relatif rendah sehingga kurang mendukung pertumbuhan selada. Sedangkan pada perlakuan M3 yang memiliki jumlah kompos+biochar dengan proporsi tinggi memungkinkan memberi efek negatif. Hal ini diduga semakin besar potensi keberadaan senyawa organik volatil yang berlebihan sehingga menimbulkan toksisitas pada tanaman selada. Biochar dalam jumlah besar memungkinkan terjadinya ketidakseimbangan komunitas mikroba tanah yang berakibat menurunnya aktivitas mikroba pengurai dan mineralisasi nutrisi sehingga suplai nutrisi ke tanaman berkurang. Peningkatan biochar pada 10 t/ha memberikan efek negatif pada tanaman terkait imobilisasi nutrisi, perubahan pH yang lebih alkalis, retensi air yang tidak terkontrol yang berdampak pada aerasi dan aktivitas mikroba tanah (Regmi et al., 2022; Vijay et al., 2021). Kandungan biochar yang tinggi di dalam media tanam mengakibatkan tingginya senyawa volatil yang mengakibatkan fitotoksitas pada pertumbuhan tanaman (Thomas, 2021). Adanya potensi C/N yang tinggi dari kompos+biochar juga dapat mengakibatkan mikroorganisme yang berperan dalam dekomposisi biochar membutuhkan nitrogen dalam jumlah besar sehingga terjadi imobilisasi nitrogen yang menyebabkan defisiensi nitrogen pada tanaman. Kompos dengan rasio C/N yang tinggi memicu terjadinya imobilisasi nitrogen oleh mikroba dan menunjukkan fitotoksitas pada tanaman selada (Phonsuwan et al., 2016). Dosis berlebihan dari kompos terbukti menurunkan pertumbuhan selada merah (Triyono et al., 2020).

Perlakuan boron berpengaruh signifikan pada umur 35 HST dibandingkan tanpa boron dan boron 2 g/L. Pada fase awal tanaman, kebutuhan akan boron mungkin belum tinggi secara spesifik. Saat mendekati panen, kebutuhan boron baru terlihat seiring meningkatnya aktivitas metabolik yang mempengaruhi proses pematangan. Dugaan lainnya, penambahan boron pada media tanam mungkin membutuhkan waktu untuk diserap oleh akar untuk angkut ke daun. Pada penelitian ini, konsentrasi boron 1 g/L memberikan efek positif karena memenuhi kebutuhan mikroelemen dibandingkan konsentrasi yang lebih tinggi (2 g/L). Boron sebagai elemen mikro, membantu mengatur metabolisme tanaman dan mempercepat pembentukan jaringan, yang mendukung pertumbuhan tinggi tanaman secara maksimal (Arunkumar et al., 2018). Ketepatan pemupukan boron mampu mendukung perkembangan titik tumbuh, dan mengoptimalkan pertumbuhan tanaman (Day & Aasim, 2020). Penelitian pada tanaman selada, pemberian boron meningkatkan pertumbuhan dan konsentrasi boron pada tanaman (Tlili et al., 2023). Pada konsentrasi yang lebih tinggi terjadi penurunan laju pertumbuhan tinggi tanaman selada yang diduga adanya konsentrasi yang melebihi ambang kebutuhan tanaman sehingga menyebabkan efek toksisitas. Boron memiliki rentang optimal yang sempit antara kebutuhan dan toksisitasnya pada tanaman dan kebutuhannya harus disesuaikan dengan jenis tanaman. Kelebihan boron menyebabkan akumulasi radikal bebas dan stres oksidatif pada jaringan tanaman yang menghambat sintesis protein dan fungsi enzim penting untuk

pertumbuhan. Pada penelitian penggunaan boron 100 g/100 m² menciptakan kondisi stres pada tanaman selada namun di bawah konsentrasi tersebut dibandingkan tanpa boron menunjukkan adanya peningkatan aktivitas enzim secara signifikan yang terlihat di tahap akhir saat jaringan berkembang pesat (Sahin et al., 2017).

Jumlah Daun

Berdasarkan data sidik ragam diketahui bahwa interaksi antara komposisi media tanam dengan konsentrasi boron berpengaruh nyata pada parameter jumlah daun 21 - 28 HST. Pada 21 HST, kombinasi perlakuan M2B0, dan M3B1 tidak berbeda nyata dengan M1B0, M1B1, M1B2, dan M2B2, namun berbeda nyata dengan kombinasi perlakuan lainnya. Pada 28 HST M3B1, tidak berbeda nyata dengan M2B0, M1B1, dan M2B2 namun berbeda nyata dengan perlakuan lainnya (Tabel 2). Perlakuan tunggal komposisi media tanam berpengaruh nyata pada umur 14 - 35 HST. Pada 14 HST, M1 dan M2 tidak berbeda nyata dengan M3 namun berbeda nyata dengan M0. Pada 21 dan 28 HST, M1, M2 dan M3 berbeda nyata dengan M0. Pada 35 HST M2 dan M3 tidak berbeda nyata dengan M1 namun berbeda nyata dengan M0. Perlakuan tunggal konsentrasi boron tidak berpengaruh pada parameter jumlah daun pada umur pengamatan.

Interaksi antara komposisi media tanam dan pupuk boron memberikan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah daun tanaman selada dalam budidaya vertikultur sistem fertigasi, khususnya pada usia 21 hingga 28 HST. Pada usia 21 HST, kombinasi perlakuan M2B0 dan M3B1 dengan boron 1 g/L menghasilkan jumlah daun tertinggi, masing-masing sebesar 8,33 helai. Pada usia 28 HST, kombinasi perlakuan M3B1 menunjukkan hasil yang lebih menonjol, dengan jumlah daun tertinggi mencapai 10,00 helai. Hasil ini menunjukkan bahwa

media tanam yang diperkaya dengan bahan organik, seperti kompos dan biochar, mampu memberikan pasokan hara yang stabil untuk mendukung perkembangan daun. Pada tahap ini, interaksi antara komposisi media tanam dan konsentrasi boron mulai memberikan pengaruh nyata. Kombinasi perlakuan M2B0 dan M3B1 dengan boron 1 g/L menghasilkan jumlah daun yang sebanding dengan M1B0 dan M1B1. Dalam hal ini, penggunaan boron pada media tanam yang diberi amandemen tanah diduga menurunkan penyerapan boron oleh tanaman. Boron terutama dalam bentuk borat ($B(OH)_4^-$) bisa diadsorpsi oleh permukaan biochar dan bahan organik dalam kompos sehingga penyediaan boron pada tanaman menjadi berkurang (Degryse, 2017). Kondisi tanah di lahan kering di Pulau Timor yang cenderung alkalis dan berkapur (Tobing et al., 2022). Percobaan boron pada tanah berkapur dengan tingkat kalsium yang berbeda menunjukkan bahwa tanah dengan kalsium karbonat terendah merupakan kondisi tanah terbaik dalam komponen pertumbuhan dan hasil, kandungan boron serta penyerapannya oleh tanaman, penyediaan boron menurun seiring dengan meningkatkan kadar kalsium di dalam tanah (Sukhvir, 2019). Pada pH yang tinggi, penyediaan bahan organik pada tanah diketahui menurunkan sorpsi Boron (Yermiyahu et al., 1995).

Media tanam berpengaruh nyata terhadap jumlah daun selada dalam budidaya vertikultur sistem fertigasi menunjukkan hasil yang signifikan pada berbagai tahap pengamatan. Berdasarkan data penelitian, kombinasi media tanam yang terdiri dari tanah, kompos, dan biochar memberikan pengaruh nyata terhadap jumlah daun, terutama pada usia 14 hingga 35 HST. Pada 14 HST, perlakuan tunggal komposisi media tanam M1, M2, dan M3 menghasilkan jumlah daun yang berbeda nyata dibandingkan M0.

Tabel 2. Jumlah Daun (helai)

Umur	Perlakuan	B0	B1	B2	Rataan
14 HST	M0	3,00 ± 0,19	3,33 ± 0,12	3,33 ± 0,12	3,22b ± 0,17
	M1	4,33 ± 0,19	4,00 ± 0,17	4,33 ± 0,17	4,22a ± 0,12
	M2	4,33 ± 0,19	4,00 ± 0,07	4,00 ± 0,07	4,11a ± 0,09
	M3	3,00 ± 0,19	4,67 ± 0,12	3,33 ± 0,12	3,67ab ± 0,04
	Rataan	3,67 ± 0,04	4,00 ± 0,06	3,75 ± 0,02	
21 HST	M0	5,33c ± 0,38	5,00c ± 0,36	4,67c ± 0,29	5,00b ± 0,34
	M1	7,33ab ± 0,19	6,67abc ± 0,12	6,67abc ± 0,29	6,89a ± 0,20
	M2	8,33a ± 0,48	5,00c ± 0,36	6,67abc ± 0,29	6,67a ± 0,14
	M3	5,67bc ± 0,29	8,33a ± 0,60	4,67c ± 0,29	6,22a ± 0,01
	Rataan	6,67 ± 0,14	6,25 ± 0,02	5,67 ± 0,15	
28 HST	M0	6,67cd ± 0,34	6,00cd ± 0,51	5,67d ± 0,31	6,11b ± 0,38
	M1	7,67bcd ± 0,05	8,00abc ± 0,07	7,67bcd ± 0,26	7,78a ± 0,10
	M2	9,33ab ± 0,43	7,00cd ± 0,22	8,00abc ± 0,36	8,11a ± 0,19
	M3	7,67bcd ± 0,05	10,00a ± 0,65	5,67d ± 0,31	7,78a ± 0,10
	Rataan (helai)	7,83 ± 0,11	7,75 ± 0,09	6,75 ± 0,20	
35 HST	M0	8,00 ± 0,22	7,00 ± 0,53	6,00 ± 0,43	7,00b ± 0,39
	M1	8,00 ± 0,22	9,00 ± 0,05	8,00 ± 0,14	8,33ab ± 0,01
	M2	10,67 ± 0,55	8,33 ± 0,14	9,00 ± 0,43	9,33a ± 0,28
	M3	8,33 ± 0,12	11,00 ± 0,63	7,00 ± 0,14	8,78a ± 0,12
	Rataan (helai)	8,75 ± 0,11	8,83 ± 0,14	7,50 ± 0,25	

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan hasil yang berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada tingkat (α) 5%.

Rata-rata jumlah daun tertinggi ditemukan pada M1 sebesar 4,22 helai dan M2 sebesar 4,11 helai, sedangkan M0 hanya menghasilkan 3,22 helai. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kompos dan biochar mampu meningkatkan kandungan bahan organik dan ketersediaan hara dalam media tanam (Samreen et al., 2022). Pada 21 HST, jumlah daun meningkat secara signifikan pada perlakuan M1, M2, dan M3, dengan masing-masing menghasilkan rata-rata 6,89 helai, 6,67 helai, dan 6,22 helai, dibandingkan M0 yang hanya mencapai 5,00 helai. Pada 28 HST, perlakuan tunggal media tanam menunjukkan bahwa M2 kembali memberikan rata-rata jumlah daun tertinggi sebesar 8,11 helai, diikuti oleh M1 dan M3 yang masing-masing mencapai 7,78 helai. Perlakuan M0 tetap menunjukkan hasil terendah, yaitu 6,11 helai. Kombinasi media tanam M3B1 menghasilkan jumlah daun tertinggi sebesar 10,00 helai, yang berbeda nyata dengan kombinasi lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan biochar dengan proporsi tinggi 75% dalam media tanam mampu menyediakan kondisi aerasi dan retensi hara yang optimal untuk perkembangan daun. Pada 35 HST, perlakuan tunggal media tanam M2 menghasilkan jumlah daun tertinggi, yaitu 9,33 helai, diikuti oleh M3 sebesar 8,78 helai dan M1 sebesar 8,33 helai. Perlakuan M0 tetap menunjukkan hasil terendah, yaitu 7,00 helai. Secara keseluruhan, komposisi media tanam M2 dan M3 memberikan hasil terbaik, karena proporsi kompos dan biochar yang optimal mampu meningkatkan kualitas fisik tanah serta menyediakan hara esensial yang stabil untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Penelitian oleh Agegnehu et al. (2016) menunjukkan bahwa aplikasi biochar dan kompos secara bersama-sama mampu meningkatkan biomassa dan aktivitas metabolisme tanaman. Penelitian (Tobing et al., 2024b), penggunaan kompos dan biochar secara bersamaan mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman pakcoy yang dibudidayakan secara vertikultur dengan sistem fertigasi sumbu. Kombinasi ini efektif meningkatkan kualitas media tanam yang mendukung peningkatan pertumbuhan tanaman pakcoy. Penambahan biochar membuat tanah lebih berpori sehingga mampu memperbaiki infiltrasi dan mengurangi kepadatan tanah sedangkan kompos berkontribusi menambah bahan organik sehingga agregasi tanah dapat mempengaruhi aerasi dan retensi air menjadi lebih baik. Penambahan biochar yang dikomposkan mampu meningkatkan hasil panen sayuran dan tanah yang infertil (Liu et al., 2019). Amandemen tanah melalui campuran biochar-kompos mampu meningkatkan hasil panen kentang dibandingkan tanpa penggunaan amandemen tanah (Mawof et al., 2021). Kombinasi keduanya mampu meningkatkan infiltrasi, retensi air, dan stabilitas agregat serta meningkatkan tanaman lobak (*Brassica oleracea* L.) (Sharma et al., 2021).

Pengaruh pupuk boron terhadap jumlah daun pada pertumbuhan selada dalam budidaya vertikultur sistem fertigasi memberikan hasil yang bervariasi pada berbagai tahap pengamatan. Berdasarkan data penelitian, perlakuan tunggal pupuk boron tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap jumlah daun pada seluruh umur pengamatan, meskipun interaksi antara boron dan media tanam menunjukkan pengaruh nyata pada beberapa tahap. Pada usia 14 HST,

perlakuan boron dengan konsentrasi B1 memberikan rata-rata jumlah daun tertinggi, yaitu 4,00 helai, dibandingkan dengan B0 sebesar 3,67 helai dan B2 sebesar 3,75 helai. Meskipun perbedaannya tidak signifikan, data ini menunjukkan potensi boron untuk mendukung perkembangan awal daun melalui perannya dalam proses pembelahan sel dan metabolisme tanaman. Boron diketahui memainkan peran penting dalam stabilisasi dinding sel tanaman dan transportasi nutrisi, yang membantu pembentukan daun secara lebih optimal (Shireen et al., 2018). Pada 21 HST, rata-rata jumlah daun tertinggi ditemukan pada perlakuan B1 sebesar 6,25 helai, sedikit lebih tinggi dibandingkan B0 6,67 helai dan B2 5,67 helai. Memberikan hasil signifikan dengan jumlah daun lebih banyak dibandingkan kombinasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa boron dengan konsentrasi optimal dapat bekerja sinergis dengan media tanam yang kaya hara, seperti kombinasi kompos dan biochar, untuk meningkatkan perkembangan vegetatif. Pada 28 HST, perlakuan boron B1 kembali menunjukkan rata-rata jumlah daun yang lebih tinggi, yaitu 7,75 helai, dibandingkan B0 sebesar 7,83 helai dan B2 sebesar 6,75 helai. Pada tahap ini, interaksi antara boron dan media tanam kembali menonjol, di mana kombinasi M2B1 dan M3B1 menghasilkan jumlah daun tertinggi. Penelitian sebelumnya oleh Day and Aasim (2020) menyatakan bahwa boron esensial untuk proses transportasi gula dan pembelahan sel, yang mendukung pertumbuhan daun. Namun, konsentrasi boron yang terlalu tinggi, seperti pada B2, dapat menyebabkan toksisitas yang berujung pada penurunan jumlah daun. Pada usia akhir pengamatan, yaitu 35 HST, perlakuan boron B1 tetap menghasilkan jumlah daun tertinggi, dengan rata-rata 8,83 helai dibandingkan B0 sebesar 8,75 helai dan B2 sebesar 7,50 helai. Penurunan jumlah daun pada B2 menunjukkan bahwa kelebihan boron dapat berdampak negatif terhadap pertumbuhan tanaman. Hal ini sesuai dengan temuan (García-Sánchez et al., 2020) menyatakan bahwa boron pada konsentrasi tinggi dapat menyebabkan keracunan pada tanaman, menghambat metabolisme, dan merusak jaringan tanaman. Secara keseluruhan, pemberian boron pada konsentrasi optimal mendukung pertumbuhan jumlah daun yang lebih baik, terutama ketika dikombinasikan dengan media tanam yang kaya akan nutrisi organik.

Bobot Segar Tajuk

Berdasarkan data sidik ragam diketahui bahwa perlakuan tunggal komposisi media tanam berpengaruh nyata pada bobot segar tajuk dimana M2 dan M3 tidak berbeda nyata dengan M1 namun berbeda nyata dengan M0 (Tabel 3). Pada perlakuan tunggal konsentrasi boron tidak berpengaruh nyata terhadap parameter bobot segar tajuk.

Berdasarkan data penelitian, perlakuan tunggal komposisi media tanam menunjukkan pengaruh nyata terhadap bobot segar tajuk, sedangkan konsentrasi boron tidak berpengaruh nyata. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas dan komposisi media tanam memiliki peran penting dalam mendukung hasil tanaman. Pada perlakuan M2, rata-rata bobot segar tajuk tertinggi tercatat sebesar 16,94 g, diikuti oleh M3 dengan bobot segar tajuk sebesar 15,93 g, dan M1 sebesar 11,44 g. Ketiga perlakuan ini berbeda nyata dengan M0, yang hanya menghasilkan bobot segar tajuk sebesar 2,44 g.

Tabel 3. Bobot segar tajuk (g)

Perlakuan	B0	B1	B2	Rataan
M0	1,77 ± 3,47	2,65 ± 3,31	2,89 ± 1,23	2,44b ± 2,67
M1	9,46 ± 1,25	15,65 ± 0,45	9,22 ± 0,60	11,44ab ± 0,07
M2	29,17 ± 4,44	9,85 ± 1,23	11,79 ± 1,34	16,94a ± 1,52
M3	14,79 ± 0,29	28,26 ± 4,09	4,74 ± 0,70	15,93a ± 1,22
Rataan	13,80 ± 0,61	14,10 ± 0,70	7,16 ± 1,31	

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan hasil yang berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada tingkat (α) 5%.

Tabel 4. Volume akar (mL)

Perlakuan	B0	B1	B2	Rataan
M0	0,13b ± 0,05	0,50ab ± 0,04	0,13b ± 0,05	0,26 ± 0,02
M1	0,17b ± 0,04	0,27ab ± 0,03	0,77a ± 0,13	0,40 ± 0,02
M2	0,77a ± 0,13	0,20ab ± 0,13	0,13b ± 0,05	0,37 ± 0,01
M3	0,20ab ± 0,03	0,50ab ± 0,04	0,17b ± 0,04	0,29 ± 0,01
Rataan	0,32 ± 0,00	0,37 ± 0,01	0,30 ± 0,01	

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan hasil yang berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada tingkat (α) 5%.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa penambahan bahan organik seperti kompos dan biochar dalam media tanam mampu meningkatkan ketersediaan hara dan retensi air, yang mendukung akumulasi biomassa tanaman. Komposisi media tanam M2 memberikan hasil terbaik karena proporsi tanah yang lebih tinggi 75% dipadukan dengan tambahan kompos dan biochar yang cukup untuk meningkatkan kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah. Biochar membantu meningkatkan kapasitas tukar kation, memperbaiki aerasi, dan meningkatkan retensi air, sementara kompos menyediakan hara esensial seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman (Oldfield et al., 2018). Selain itu, kombinasi media tanam dengan biochar pada M3 juga memberikan hasil yang hampir setara, menunjukkan bahwa biochar pada proporsi yang lebih tinggi tetap efektif dalam meningkatkan bobot segar tajuk tanaman. Sebaliknya, perlakuan M0 menghasilkan bobot segar tajuk terendah karena hanya menggunakan tanah tanpa tambahan bahan organik. Hal ini menegaskan bahwa tanah saja tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan nutrisi dan struktur fisik yang optimal untuk pertumbuhan selada. Penggunaan biochar dan kompos sebagai campuran pada tanah mampu mendukung media tanam sebagai tempat tumbuhnya akar yang menyerap air dan nutrisi untuk tanaman. Biochar dan kompos menjadi suatu amandemen tanah yang lengkap dalam memperbaiki kondisi-kondisi tanah margin. Efek biochar memberi perbaikan tanah secara fisik melalui ruang pori tanah dengan kepadatan yang tinggi sedangkan kompos mampu meningkatkan bahan organik pada tanah dan membantu pelepasan-pelepasan ion hara melalui mikroorganisme di dalam tanah. Kondisi media tanam yang diberi kompos dan biochar secara tidak langsung mampu memenuhi kebutuhan nutrisi untuk meningkatkan bobot segar tajuk tanaman pakcoy. Pemberian keduanya pada media tanam mampu meningkatkan hasil tanaman pakcoy dan serapan nitrogen pada budidaya vertikultur sistem fertigasi (Bu'ulolo et al., 2025; Neonbasu & Tobing, 2025; Opat et al., 2024). Dibandingkan dengan pemberian biochar murni, penggunaan biochar yang dicampurkan dengan

kompos lebih efektif dalam meningkatkan tanaman selada tiga kali lipat (Mikajlo et al., 2024).

Volume Akar

Berdasarkan data sidik ragam dapat dilihat bahwa terjadi interaksi antara komposisi media tanam dengan konsentrasi boron pada parameter volume akar dimana perlakuan M1B2, dan M2B0 tidak berbeda nyata dengan perlakuan M0B1, M1B1, M2B1, M3B0 dan M3B1 namun berbeda nyata dengan perlakuan lainnya (Tabel 4). Perlakuan tunggal komposisi media tanam dan konsentrasi boron tidak berpengaruh nyata terhadap parameter volume akar. Interaksi antara media tanam dan pupuk boron memberikan pengaruh signifikan terhadap volume akar tanaman selada dalam budidaya vertikultur sistem fertigasi. Kombinasi perlakuan yang optimal mampu mendukung perkembangan sistem perakaran. Pada perlakuan M1B2 dan M2B0 menghasilkan 0,77 mL, meskipun secara statistik tidak berbeda nyata dengan M3B0, M0B1, M1B1, M2B1, dan M3B1. Hal ini mengindikasikan bahwa respon tanaman terutama pada akar terhadap interaksi media tanam dan boron bersifat kompleks. Diduga terdapat interaksi non linier antara proporsi bahan organik (biochar dan kompos) dalam media tanam dengan ketersediaan boron. Keberadaan biochar dan kompos dalam jumlah yang banyak, terutama bila dikombinasikan dengan konsentrasi boorn yang tinggi (M3B2) cenderung menurunkan volume akar. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya dimana pengujian biochar pada proporsi yang besar dapat meningkatkan pH media tanam sehingga dapat mengakibatkan ketersediaan boron menurun akibat perubahan bentuk ionik pada kondisi alkalis (Akhter et al., 2015; Chisté et al., 2024). Selain itu, proporsi kompos yang berlebihan juga dapat mengganggu keseimbangan hara yang mempengaruhi pertumbuhan akar. Efektivitas boron sangat bergantung pada kondisi media tanam (Ghazimahalleh et al., 2022). Interaksi boron dengan biochar pada penelitian sebelumnya diketahui mempunyai pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan produktivitas tanaman (Abd El-Wahed et al., 2023). Pada beberapa perlakuan tanpa menggunakan boron menunjukkan volume akar yang relatif tinggi (M2B0 dan M3B0). Hal ini

menunjukkan bahwa penggunaan kompos dan biochar dalam proporsi tertentu sudah mampu menyediakan kebutuhan nutrisinya. Hal ini juga menunjukkan bahwa ketepatan proporsi bahan organik seperti biochar dan kompos yang optimal akan mempengaruhi kinerja boron agar tidak menimbulkan efek antagonistik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penggunaan media tanam 75 % : 25% dengan konsentrasi boron 1 g/L berpengaruh nyata pada tinggi tanaman, jumlah daun, dan volume akar selada yang dibudidayakan secara vertikultur dengan sistem fertigasi sumbu. Penelitian ini masih memerlukan kajian penentuan batas optimal penggunaan konsentrasi boron pada proporsi formulasi media tanam yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd El-Wahed, M. H., Eissa, M. A., Almasoudi, N. M., & Abo-Elyousr, K. A. M. (2023). Macronutrient-rich biochar induces boron nanoparticles in improving the salt tolerance of pomegranate (*Punica granatum* L.) in arid degraded soils. *Scientia Horticulturae*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111908>
- Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>
- Akhter, A., Hage-Ahmed, K., Soja, G., & Steinkellner, S. (2015). Compost and biochar alter mycorrhization, tomato root exudation, and development of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Frontiers in Plant Science*, 6(JULY). <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00529>
- Arunkumar, B., Thippeshappa, G., Anjali, M., & Prashanth, K. (2018). Boron: A critical micronutrient for crop growth and productivity. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(2).
- Bu'ulolo, W. J., Ceunfin, S., Tobing, W. L., & Tefa, A. Y. (2025). Pertumbuhan Pakcoy di Lahan Kering melalui Optimalisasi Media dan Baris Tanam dalam Vertikultur Fertigasi. *Agroteknika*, 8(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.55043/agroteknika.v8i2.521>
- Chisté, L., Melo, L. C. A., Jindo, K., & Silva, C. A. (2024). Biochar-Boron Composites: Synthesis, Properties and Agronomic Effectiveness for Eucalyptus Seedlings. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40538-024-00645-2>
- Darsana, L., Pardono, P., & Sugianto, H. (2014). Penggunaan Boron untuk Meningkatkan Pertumbuhan, Hasil, dan Kandungan Minyak Kacang Tanah. *Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi*, 16(2). <https://doi.org/10.20961/agsjpa.v16i2.18912>
- Day, S., & Aasim, M. (2020). Role of Boron in Growth and Development of Plant: Deficiency and Toxicity Perspective. In *Plant Micronutrients: Deficiency and Toxicity Management*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49856-6_19
- Degryse, F. (2017). Boron fertilizers: Use, challenges and the benefit of slow-release sources – a review. *Journal of Boron*, 2(3).
- EL-Mogy, M. M., Adly, M. A., Shahein, M. M., Hassan, H. A., Mahmoud, S. O., & Abdeldaym, E. A. (2024). Integration of Biochar with Vermicompost and Compost Improves Agro-Physiological Properties and Nutritional Quality of Greenhouse Sweet Pepper. *Agronomy*, 14(11). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy14112603>
- García-Sánchez, F., Simón-Grao, S., Martínez-Nicolás, J. J., Alfosea-Simón, M., Liu, C., Chatzissavvidis, C., Pérez-Pérez, J. G., & Cámara-Zapata, J. M. (2020). Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. *Journal of Hazardous Materials*, 397. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122713>
- Ghazimahalleh, B. G., Amerian, M. R., Kahneh, E., Rahimi, M., & Tabari, Z. T. (2022). Effect of Biochar, Mycorrhiza, and Foliar Application of Boron on Growth and Yield of Peanuts. *Gesunde Pflanzen*, 74(4). <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00702-6>
- Gunarathne, V., Mayakaduwa, S., & Vithanage, M. (2017). Biochar's influence as a soil amendment for essential plant nutrient uptake. In *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58841-4_3
- Hanim, N., Khairullah, K., & Jufri, Y. (2021). Pemanfaatan Biochar dan Kompos Limbah Pertanian untuk Perbaikan Sifat Fisika Tanah, Pertumbuhan dan Hasil Jagung pada Lahan Kering. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 6(4). <https://doi.org/10.17969/jimfp.v6i4.18385>
- Izhar, A., Sitawati, S., & Heddy, Y. S. (2016). Pengaruh Media Tanam dan Bahan Vertikultur terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Pakcoy (*Brassica juncea* L.). *Jurnal Produksi Tanaman*, 4(7). 562-569.
- Liu, B., Cai, Z., Zhang, Y., Liu, G., Luo, X., & Zheng, H. (2019). Comparison of efficacies of peanut shell biochar and biochar-based compost on two leafy vegetable productivity in an infertile land. *Chemosphere*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.100>
- Matheus, R., Basri, M., Rompon, M. S., & Neonufa, N. (2017). Strategi Pengelolaan Pertanian Lahan Kering Dalam Meningkatkan Ketahanan Pangan di Nusa Tenggara Timur. *Partner*, 22(2). <https://doi.org/10.35726/jp.v22i2.246>
- Mawof, A., Prasher, S., Bayen, S., & Nzediegwu, C. (2021). Effects of Biochar and Biochar-Compost Mix as Soil Amendments on Soil Quality and Yield of Potatoes Irrigated with Wastewater. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4). <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00549-2>
- Mikajlo, I., Lerch, T. Z., Louvel, B., Hynšt, J., Záhora, J., & Pourrut, B. (2024). Composted Biochar Versus Compost with Biochar: Effects on Soil Properties and Plant Growth. *Biochar*, 6(1).

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42773-024-00379-2>
- Mu, D., Hawks, J., & Diaz, A. (2020). Impacts on vegetable yields, nutrient contents and soil fertility in a community garden with different compost amendments. *AIMS Environmental Science*, 7(4). <https://doi.org/10.3934/environsci.2020023>
- Naisaban, F., Tobing, W. L., Tefa, A. Y., & Naikofi, K. I. (2023a). Optimasi Penggunaan Pupuk Organik untuk Meningkatkan Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.) Budidaya Vertikultur dengan Sistem Fertigasi. *Prosiding Seminar Nasional Fakultas Pertanian UNS*, 8(2).
- Neonbasu, N. B., & Tobing, W. L. (2025). The Effect of N Fertilizer with Media and Planting Rows in Verticulture Cultivation of Fertigation System On Pakcoy Plants in Dry Land. *Agrisaintifika*, 9(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.32585/ags.v9i2.6460>
- Neonbeni, E. Y., Tobing, W. L., Gumelar, A. I., Tuas, M. A., & Sabuna, R. (2022). Pertumbuhan tanaman pakcoy (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) sistem vertikultur dengan fertigasi di lahan kering. *Agromix*, 13, 159–167. <https://doi.org/https://doi.org/10.35891/agx.v13i2.2961>
- Oldfield, T. L., Sikirica, N., Mondini, C., López, G., Kuikman, P. J., & Holden, N. M. (2018). Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. *Journal of Environmental Management*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.061>
- Opat, Y. N., Tobing, W. L., Tefa, A. Y., & Ndua, N. D. D. (2024). The Effect of Different Sources of Nitrogen Fertilizer and Types of Ameliorant on Growth and Yield and Nitrogen Uptake Of Pakcoy (*Brassica rapa* L.) Plants Through Inner Witch System. *Jurnal Agroqua: Media Informasi Agronomi Dan Budidaya Perairan*, 22(1), 132–139.
- Phonsuwan, M., Lee, M. H., Moon, B. E., Kim, Y. B., Kaewjampa, N., Yoon, Y. C., & Kim, H. T. (2016). Effect of Immature Compost on Available Nutrient Capability and Heavy Metal Accumulation in Soil for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivation. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 25(4). <https://doi.org/10.12791/ksbec.2016.25.4.343>
- Regmi, A., Singh, S., Moustaid-Moussa, N., Coldren, C., & Simpson, C. (2022). The Negative Effects of High Rates of Biochar on Violas Can Be Counteracted with Fertilizer. *Plants*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/plants11040491>
- Sahin, S., Kısa, D., Göksu, F., & Geboloğlu, N. (2017). Effects of boron applications on the physiology and yield of lettuce. *Annual Research and Review in Biology*, 21(6). <https://doi.org/10.9734/ARRB/2017/38772>
- Samreen, T., Rashid, S., Zulqernain Nazir, M., Riaz, U., Noreen, S., Nadeem, F., Kanwal, S., Munir, H., & Tul-Muntaha, S. (2022). Co-application of Boron, Sulphur, and Biochar for Enhancing Growth and Yield of Brassica napus under Calcareous Soil. In *Communications in Soil Science and Plant Analysis* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2043339>
- Seadh, S., Abdel-Moneam, M., Sarhan, H., El-Sherpiny, mohamed, & El-Agamy, H. (2021). Possibility of Using Compost as A Partial Substitute for Mineral Nitrogen Fertilizer and Evaluating This on Performance of Sugar Beet Plants Sprayed with Boron from Different Sources. *Journal of Plant Production*, 12(10). <https://doi.org/10.21608/jpp.2021.205717>
- Sharma, P., Abrol, V., Sharma, V., Chaddha, S., Srinivasa Rao, C., Ganie, A. Q., Ingo Hefft, D., El-Sheikh, M. A., & Mansoor, S. (2021). Effectiveness of biochar and compost on improving soil hydro-physical properties, crop yield and monetary returns in inceptisol subtropics. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(12). <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.043>
- Shireen, F., Nawaz, M. A., Chen, C., Zhang, Q., Zheng, Z., Sohail, H., Sun, J., Cao, H., Huang, Y., & Bie, Z. (2018). Boron: Functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 19, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/ijms19071856>