

PENINGKATAN KUALITAS NUTRISI MICROGREEN BROKOLI DENGAN LAMPU LED MULTISPEKTRUM*Improving the Nutritional Quality of Broccoli Microgreen using Multispectrum LED Light***Ni Kadek Mika Rejati¹, Wahyu Harso^{2*}, Musjaya M. Guli³, Eny Yuniati⁴, Prismawiryanti⁵**^{1,2,3,4})Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tadulako⁵)Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tadulako

Jl. Soekarno Hatta Km. 9 Tondo Palu Sulawesi Tengah, 94118, Indonesia

^{2*)}wahyu.harso@gmail.com**ABSTRAK**

Kualitas cahaya merupakan salah satu faktor yang berperan penting dalam produksi microgreen di lingkungan terkendali. Lampu LED banyak dimanfaatkan karena menghasilkan spektrum cahaya yang dapat diatur sesuai kebutuhan tanaman dengan efisiensi energi tinggi dan emisi panas yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan spektrum cahaya antara lampu LED putih dan lampu LED multispektrum terhadap pertumbuhan, kandungan polifenol, dan aktivitas antioksidan microgreen brokoli. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan perlakuan perbedaan spektrum cahaya LED yaitu LED putih dan LED multispektrum pada budidaya microgreen brokoli. Parameter yang diamati meliputi tinggi dan bobot segar tanaman, kandungan polifenol, dan aktivitas antioksidan. Data dianalisis menggunakan uji t pada taraf nyata 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis lampu LED tidak berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman dan bobot segar microgreen brokoli. Sebaliknya, penggunaan lampu LED multispektrum menghasilkan kandungan polifenol yang lebih tinggi dan aktivitas antioksidan yang lebih kuat, sebagaimana yang ditunjukkan oleh nilai IC₅₀ yang lebih rendah. Kandungan polifenol juga menunjukkan korelasi positif yang kuat dengan aktivitas antioksidan. Hasil penelitian ini mendukung penggunaan lampu LED multispektrum dalam budidaya microgreen brokoli di lingkungan terkendali untuk menghasilkan produk dengan kualitas fungsional yang lebih baik. Temuan ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam pengembangan sistem produksi microgreen berkualitas tinggi, khususnya untuk memenuhi kebutuhan pangan fungsional yang kaya senyawa bioaktif dan memiliki aktivitas antioksidan tinggi.

Kata kunci: lampu LED, microgreen brokoli, pertumbuhan, polifenol**ABSTRACT**

Light quality is one of the key factors influencing microgreen production in controlled environments. LED lamps are widely used because they generate a light spectrum that can be adjusted according to plant needs, with high energy efficiency and low heat emission. This study aims to determine the effect of different light spectra between white LED and multispectral LED on the growth, polyphenol content, and antioxidant activity of broccoli microgreens. The study employed a Completely Randomised Design with treatments consisting of different LED light spectra, namely white LED and multispectral LED, in broccoli microgreen cultivation. Observed parameters included plant height and fresh weight, polyphenol content, and antioxidant activity. Data were analysed using a t-test at 5% significance level. The results showed that the type of LED light had no significant effect on the plant height or fresh weight of broccoli microgreen. Conversely, the use of multispectral LED lights yielded higher polyphenol content and stronger antioxidant activity, as evidenced by the lower IC₅₀ values. Polyphenol content also shows a strong positive correlation with antioxidant activity. The results of this study support the use of multispectral LED light for cultivating broccoli microgreens in controlled environments to produce product with improved functional quality. These findings can serve as a basis for developing high quality microgreen production systems, particularly to meet the demand for functional foods rich in bioactive compounds and high in antioxidant activity.

Keywords: broccoli microgreen, growth, LED light, polyphenol**PENDAHULUAN**

Kebutuhan masyarakat terhadap makanan sehat dan berkualitas semakin hari semakin meningkat terkait kepedulian

kesehatan jangka panjang. Sayuran hijau merupakan sumber vitamin, mineral, dan antioksidan yang dapat mencegah berbagai penyakit degeneratif (Nurzyńska-Wierdak,

2025). Namun, budidaya sayuran secara konvensional sering terkendala oleh keterbatasan lahan, iklim yang tidak menentu, dan penggunaan air dan sumber energi yang lebih banyak (Singh *et al.*, 2024). Budidaya dalam lingkungan terkendali seperti produksi microgreen merupakan salah satu cara untuk mengatasi kendala yang dihadapi oleh budidaya konvensional (Pereira *et al.*, 2026).

Produksi microgreen memiliki siklus hidup pendek berkisar 10-20 hari setelah biji disemai (Ayeni, 2021). Microgreen memiliki kandungan nutrisi yang lebih tinggi dari sayuran biasa (Gogoi *et al.*, 2025). Sayuran yang biasa dibudidayakan adalah brokoli. Brokoli masuk dalam keluarga Brassicaceae yang mengandung senyawa glukosinolat dan polifenol yang berperan sebagai antioksidan pada tubuh (Le *et al.*, 2020).

Salah satu faktor lingkungan dalam produksi microgreen adalah kualitas cahaya. Penggunaan lampu LED (*Light Emitting Diode*) banyak digunakan untuk produksi microgreen karena memiliki efisiensi yang baik dan emisi panas yang rendah. Penggunaan lampu LED memungkinkan pengendalian spektrum cahaya yang sesuai dengan kebutuhan fisiologi tanaman (Borrelli *et al.*, 2026). Penelitian terhadap spektrum cahaya terbaik lampu LED terhadap kualitas dan kuantitas microgreen masih berlanjut

karena adanya perbedaan spesifik jenis microgreen terhadap spektrum cahaya (Toscano *et al.*, 2021).

Lampu LED putih sering digunakan untuk produksi microgreen (Podsędek *et al.*, 2023). Sementara itu, lampu LED multispektrum yang diklaim sebagai lampu pertumbuhan tanaman (*Growth Light*) sudah beredar di pasaran. Lampu LED multispektrum tersebut memiliki spektrum warna merah, biru, putih, inframerah, dan ultraviolet. Perbedaan sebaran foton yang dihasilkan oleh lampu LED dapat memicu perbedaan respons fisiologis tanaman (Zhuang *et al.*, 2022). Toscano *et al.* (2021) melaporkan bahwa penggunaan lampu LED biru atau merah menghasilkan tinggi dan biomassa yang lebih besar dibandingkan lampu LED putih. Lampu LED biru juga meningkatkan kandungan karotenoid. Meskipun Gao *et al.* (2020) melaporkan sebaliknya bahwa penggunaan lampu LED putih lebih meningkatkan pertumbuhan dan kandungan karotenoid dibandingkan penggunaan lampu LED biru, hijau, kuning, atau merah.

Penelitian penggunaan LED dengan spektrum cahaya tunggal (Park *et al.*, 2020; Toscano *et al.*, 2021; Zhuang *et al.*, 2022) maupun kombinasi terbatas seperti kombinasi merah dengan biru telah dilakukan terhadap pertumbuhan dan kualitas microgreen (Brazaitytė *et al.*, 2021; Luo *et al.*, 2024; Qiao *et al.*, 2024). Namun,

kajian mengenai penggunaan lampu LED multispektrum yang mengintegrasikan spektrum merah, biru, putih, inframerah dan ultraviolet dalam satu lampu masih sangat terbatas. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh faktor perbedaan spektrum cahaya pada lampu LED putih dengan lampu LED multispektrum terhadap pertumbuhan, kandungan polifenol, dan aktivitas antioksidan microgreen brokoli.

METODOLOGI PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Anatomi dan Fisiologi Tumbuhan, Program Studi Biologi, FMIPA antara Desember 2025 dan Februari 2026. Uji kadar polifenol dan nilai aktivitas antioksidan dilakukan di Laboratorium Penelitian, Program Studi Kimia, FMIPA Universitas Tadulako.

Alat dan Bahan

Alat penelitian berupa nampan semai (32,5 x 25 cm), rak (100 x 50 x 50 cm), botol semprot, silet, penggaris, neraca analitik, lampu LED putih, lampu LED multispektrum, spektrofotometer UV-Vis, erlenmeyer, labu ukur, spatula, gelas ukur, corong kaca, tabung reaksi, pipet tetes, shaker, gelas kimia, rotary evaporator, kamera dan alat tulis. Bahan yang digunakan berupa biji brokoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*), air, pupuk NPK, cocopeat, tanah lapisan atas, kertas label,

etanol, DPPH, larutan induk asam galat, akuades, kertas saring, reagen Folin-Ciocalteu, Larutan Na₂CO₃ 20%.

Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan desain Rancangan Acak Lengkap dengan satu faktor berupa variasi pencahayaan lampu LED yaitu lampu LED putih dan lampu LED multispektrum. Masing masing perlakuan diulang sebanyak 3 kali. Dalam masing masing ulangan terdiri dari 192 tanaman sehingga jumlah tanaman keseluruhan adalah 1152 tanaman. Seluruh tanaman yang ada digunakan untuk analisis bobot segar, kandungan polifenol, dan aktivitas antioksidan.

Prosedur Penelitian

Media tanam berupa campuran tanah dan cocopeat yang dihomogenkan dengan rasio volume 1:1. Tanah diambil dari lapisan permukaan pada kedalaman 0-20 cm, sedangkan cocopeat berasal dari produk komersial. Sebanyak 1.100 g campuran media dimasukkan ke dalam setiap nampan semai berukuran 32,5 x 25 cm. Selanjutnya, media diberi pupuk NPK 16:16:16 sebanyak 3 g per nampan. Aplikasi pupuk dilakukan dengan melarutkan ke dalam air, kemudian larutan tersebut disemprotkan secara merata hingga menutupi permukaan media tanam. Kelembaban media tanam dipertahankan pada kondisi setara dengan 100% kapasitas lapang. Setelah media tanam siap, dibuat

192 lubang tanam pada setiap nampan yang disusun dalam pola 16 x 12 dengan jarak antar lubang sekitar 1,7 cm. Biji brokoli yang diperoleh secara komersial direndam dalam air selama 10 menit sebelum disemai. Penyemaian dilakukan dengan memasukkan dua biji ke setiap lubang tanam pada nampan semai. Selanjutnya seluruh nampan ditempatkan secara acak pada rak berukuran 100 x 50 x 50 cm (panjang x lebar x tinggi) yang berada di dalam ruangan. Setiap rak menampung tiga nampan semai dan memperoleh penyinaran dari dua unit lampu LED. Masing-masing lampu memiliki daya listrik sekitar 8 watt. Pada hari ketiga setelah benih berkecambah, dilakukan penjarangan dengan membuang salah satu semai pada setiap lubang sehingga hanya tersisa satu tanaman yang memiliki ukuran yang relatif seragam.

Sejak benih disemai hingga dipanen, penyinaran diberikan selama 12 jam setiap hari mulai pukul 06.00 hingga 18.00. Kondisi kelembaban media dipantau setiap dua hari menggunakan metode gravimetri untuk mempertahankan kadar air pada kisaran 70% kapasitas lapang. Apabila diperlukan, penambahan air dilakukan dengan penyemprotan menggunakan sprayer sehingga distribusi air pada media tanam merata. Untuk meminimalkan perbedaan kondisi lingkungan di dalam rak,

posisi setiap nampan diacak secara berkala selama masa budidaya.

Evaluasi pertumbuhan tanaman dilakukan pada umur 13 hari setelah penyemaian dengan mengamati tinggi dan bobot segar tanaman. Pengukuran tinggi dilakukan terhadap 10 tanaman yang dipilih secara acak dari setiap nampan, dengan memperhatikan penyebaran titik pengambilan sampel agar seluruh bagian nampan terwakili. Tinggi tanaman ditentukan sebagai jarak dari pangkal batang hingga ujung pucuk tertinggi menggunakan penggaris. Bobot segar dihitung setelah tanaman pada setiap nampan dipanen dan bagian akarnya dipisahkan. Total bobot yang diperoleh dibagi dengan jumlah tanaman dalam nampan untuk mendapatkan nilai rata-rata berat segar per tanaman.

Kandungan polifenol dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis berdasarkan prosedur yang dikemukakan oleh Lucas *et al.* (2022). Aktivitas antioksidan diukur melalui metode spektrofotometri dengan memanfaatkan reagen 2,2 -difenil-1-pikrihidrazil (DPPH). Persentase penghambatan radikal bebas pada konsentrasi ekstrak selanjutnya diplot untuk membentuk kurva regresi yang digunakan dalam penentuan nilai IC₅₀. Nilai Indeks Aktivitas Antioksidan (*Antioxidant Activity Index*, AAI) dihitung menggunakan persamaan $AAI = \text{konsentrasi akhir DPPH}$

dalam campuran reaksi/ IC_{50} sebagaimana dijelaskan oleh Takao *et al.* (2015). Pada penelitian ini, konsentrasi akhir DPPH yang digunakan adalah 19 ppm. Selanjutnya nilai AAI dianalisis hubungannya dengan kandungan polifenol untuk mengetahui korelasi antara kedua parameter tersebut.

Analisis statistik terhadap data dilakukan menggunakan uji t pada taraf signifikansi 5% dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

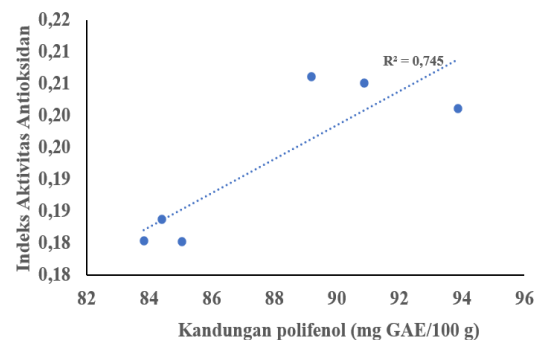
Hasil

Hasil uji statistik menunjukkan bahwa perlakuan lampu LED putih menghasilkan tinggi tanaman dan bobot segar microgreen brokoli yang tidak berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan lampu LED multispektrum. Akan tetapi, perlakuan lampu LED multispektrum meningkatkan kandungan polifenol. Microgreen brokoli di bawah lampu LED multispektrum memiliki nilai IC_{50} lebih rendah dibandingkan dengan di bawah lampu LED putih, yang menunjukkan aktivitas antioksidan yang lebih tinggi (Tabel 1).

Tabel 1. Pertumbuhan, kandungan polifenol, dan aktivitas antioksidan microgreen brokoli

Paramater	Lampu		Hasil uji t
	LED putih	LED Multi spektrum	
Tinggi tanaman (cm)	$7,42 \pm 0,35$	$7,49 \pm 0,23$	tidak signifikan
Bobot segar (g)	$0,11 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	tidak signifikan
Kandungan polifenol (mg GAE/100 g)	$84,43 \pm 0,61$	$91,31 \pm 2,37$	Signifikan
IC_{50} (ppm)	$108,68 \pm 1,16$	$96,61 \pm 1,26$	Signifikan

Sumber: Data primer setelah diolah (2026)



Gambar 1. Korelasi antara kandungan polifenol dengan indeks aktivitas antioksidan

Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa kandungan polifenol memiliki hubungan positif yang kuat dengan indeks aktivitas antioksidan pada microgreen brokoli (Gambar 1). Koefisien korelasi yang diperoleh sebesar $R = 0,86$ mengindikasikan bahwa peningkatan kandungan polifenol diikuti oleh peningkatan nilai aktivitas antioksidan.

Pembahasan

Salah satu faktor lingkungan yang berperan penting dalam mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman adalah kualitas cahaya. Cahaya berfungsi sebagai sinyal lingkungan yang mengatur proses fisiologis dan perkembangan tanaman. Karakteristik cahaya akan mempengaruhi berbagai tanggapan

morfologi, fisiologi, dan biokimia tanaman (Gao *et al.*, 2020).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang nyata antara lampu LED putih dan lampu LED multispektrum terhadap pertumbuhan dan berat segar microgreen brokoli. Hal ini mungkin disebabkan karena kedua jenis lampu sama-sama memenuhi kebutuhan energi untuk fotosintesis dasar dalam proses pertumbuhan vegetatif yang singkat. Lampu LED putih menghasilkan spektrum cahaya kontinu pada daerah tampak dengan panjang gelombang 400-700 nm (Smith & Karunadasa, 2018) sehingga mampu diserap oleh pigmen fotosintesis terutama klorofil a dan klorofil b dan masih cukup untuk mendukung pembentukan biomassa (Tabbert *et al.*, 2021).

Lampu LED multispektrum yang digunakan memiliki spektrum warna merah memiliki panjang gelombang 600-700 nm, biru 400-500 nm, ultraviolet 180-380 nm dan infra merah lebih dari 760 nm (Tsai & Hamblin, 2017; Yulkifli *et al.*, 2019). Cahaya merah berperan penting dalam meningkatkan akumulasi efisiensi fotosintesis, mempercepat pemanjangan batang, dan meningkatkan akumulasi biomassa melalui aktivasi sistem fitokrom (Congpei *et al.*, 2025; Rehman *et al.*, 2020; Zaghdoud *et al.*, 2026). Cahaya biru berfungsi mengatur pembentukan kloroplas, sintesis klorofil, dan pembukaan

stomata (X. Y. Liu *et al.*, 2018; Matthews *et al.*, 2020). Cahaya putih berfungsi sebagai sumber cahaya dasar yang menyerupai cahaya alami. Cahaya inframerah dapat mempengaruhi keseimbangan sistem fitokrom melalui tanggapan merah/merah jauh (red/far-red) (Kusuma *et al.*, 2021) yang memungkinkan tanaman untuk merasakan dan menanggapi lingkungan cahaya, mengatur proses penting pertumbuhan hipokotil dan perkecambahan biji (Muroddinova, 2025; Sheerin & Hiltbrunner, 2017). Cahaya ultraviolet berperan sebagai sinyal cekaman ringan yang memacu metabolisme sekunder dibandingkan meningkatkan pertumbuhan primer (Xu *et al.*, 2021). Meskipun lampu LED multispektrum memiliki komposisi spektrum yang lebih lengkap, keunggulan tersebut tidak diikuti oleh peningkatan tinggi dan bobot segar tanaman pada penelitian ini. Hal ini menunjukkan bahwa kebutuhan cahaya untuk pertumbuhan primer selama fase microgreen terpenuhi oleh kedua jenis lampu LED tersebut.

Tidak adanya hambatan pertumbuhan pada perlakuan lampu LED multispektrum menunjukkan bahwa energi cahaya berlebih yang tidak dimiliki oleh lampu LED putih tidak menghambat proses fisiologis utama pada microgreen brokoli. Hal ini mungkin disebabkan oleh masa panen microgreen brokoli yang hanya 13 hari. Microgreen yang dipanen pada fase

awal pertumbuhan masih sangat tergantung pada cadangan makanan yang tersimpan dalam biji (Kalal *et al.*, 2021). Karbohidrat, protein, dan lipid yang terdapat pada kotiledon masih menjadi sumber utama energi untuk pembentukan akar, batang, dan daun pertama (Azevedo-Da-silva *et al.*, 2023). Pengaruh kualitas spektrum cahaya terhadap pertumbuhan microgreen belum terlihat secara nyata apabila kondisi lingkungan lainnya masih berada pada kisaran optimum (Martínez-Moreno *et al.*, 2024; Proietti *et al.*, 2021).

Berbeda dengan parameter pertumbuhan, penggunaan lampu LED multispektrum meningkatkan kandungan polifenol secara nyata. Temuan ini menegaskan bahwa kualitas spektrum cahaya memiliki pengaruh terhadap akumulasi senyawa metabolit sekunder (Murthy *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2021). Penambahan kandungan polifenol pada kondisi pencahayaan lampu LED multi spektrum kemungkinan disebabkan oleh stimulasi jalur biosintesis pertahanan tanaman terhadap panjang gelombang tertentu. Cahaya ultraviolet memicu tanggapan terhadap cekaman ringan yang mengarahkan tanaman untuk menghasilkan senyawa antioksidan (Mishra *et al.*, 2020) sehingga kadar polifenol pada microgreen brokoli meningkat. Namun demikian, paparan cahaya ultraviolet pada intensitas tinggi dilaporkan justru akan menghambat

pertumbuhan dan kerusakan sel (Soltanbeigi & Lysiuk, 2026). Polifenol merupakan metabolit sekunder yang disintesis tanaman sebagai tanggapan terhadap cekaman cahaya pada panjang gelombang tertentu (Zagoskina *et al.*, 2023). Sintesis senyawa fenolik diawali oleh aktivitas enzim phenillalanine amminia-lyase (PAL) yang dipengaruhi oleh kualitas cahaya (Talukder, 2020; Wu *et al.*, 2025). Kemungkinan lainnya adalah bahwa gabungan berbagai spektrum cahaya pada lampu LED multispektrum dapat mengaktifkan beberapa sistem fotoreseptor sehingga menghasilkan efek sinyal yang terintegrasi (Rahman *et al.*, 2021). Cahaya merah mengaktifkan fitokrom, cahaya biru mengaktifkan cryptochrome, sedangkan ultraviolet mengaktifkan UVR8. Aktivasi beberapa sistem fotoreseptor secara bersamaan mampu meningkatkan ekspresi faktor transkripsi HY5 sehingga meningkatkan kandungan flavonoid (Leonardelli *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2017)

Aktifitas antioksidan ditunjukkan dengan nilai IC₅₀. Semakin rendah nilai IC₅₀ maka semakin tinggi kemampuan antioksidan dalam menangkal radikal bebas (Alam *et al.*, 2024). Microgreen brokoli yang ditumbuhkan dengan lampu LED putih memiliki nilai IC₅₀ yang lebih besar dibandingkan dengan yang ditumbuhkan dengan lampu LED multispektrum. Hal ini berarti bahwa microgreen brokoli yang

ditumbuhkan dengan lampu LED multispektrum memiliki aktivitas antioksidan yang lebih kuat dibandingkan dengan yang ditumbuhkan dengan lampu LED putih. Perbedaan kemampuan ini berkaitan dengan peningkatan kandungan polifenol pada perlakuan lampu LED multispektrum. Semakin tinggi kandungan polifenol semakin besar aktivitas antioksidan tanaman. Senyawa polifenol memiliki banyak gugus hidroksi (-OH) yang mampu mendonorkan atom hidrogen atau elektron kepada radikal bebas sehingga radikal bebas tersebut menjadi lebih stabil dan kehilangan sifat reaktifnya (Bolaños-Cardet *et al.*, 2026).

Selain polifenol, cahaya multispektrum berpotensi meningkatkan akumulasi senyawa antioksidan lain seperti flavonoid, vitamin C, karotenoid, dan glukosinolat yang dikenal sebagai metabolit sekunder pada tanaman dari Famili Brassicaceae (Frede *et al.*, 2023; Haghighi *et al.*, 2025). Senyawa tersebut kemungkinan memberikan kontribusi terhadap peningkatan aktivitas antioksidan. Akan tetapi pada penelitian ini senyawa tersebut tidak dianalisis.

Hasil penelitian juga menunjukkan adanya korelasi kuat antara kandungan polifenol dan aktivitas antioksidan. Korelasi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kandungan polifenol diikuti oleh peningkatan aktivitas antioksidan. Hal

ini menunjukkan bahwa senyawa polifenol merupakan pembentuk utama dari kekuatan antioksidan pada microgreen brokoli (Kim *et al.*, 2022; Pavlović *et al.*, 2025).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penggunaan lampu LED multispektrum dapat meningkatkan kualitas nutrisi microgreen brokoli dengan meningkatnya kandungan polifenol meskipun tidak berdampak terhadap pertumbuhan dan biomassa.

Saran

Penelitian selanjutnya perlu mengkaji tanggapan berbagai macam kultivar maupun jenis microgreen lain terhadap paparan lampu LED multispektrum untuk memperluas penerapan teknologi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, W., Khan, H., Jan, M. S., Darwish, H. W., Daglia, M., & Elhenawy, A. A. (2024). In vitro 5-LOX inhibitory and antioxidant potential of isoxazole derivatives. *PLoS ONE*, 19(10), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297398>
- Ayeni, A. (2021). Nutrient content of micro/baby-green and field-grown mature foliage of tropical spinach (*Amaranthus* sp.) and roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Foods*, 10(11), 1–12. <https://doi.org/10.3390/foods10112546>
- Azevedo-Da-silva, D. A., Alves-De-oliveira, D. F., Bezerra-De-oliveira, H. C., Feitosa, T. M., da Silva, I. B., Giordani, R. B., & Voigt, E. L. (2023). Reserve mobilization and secondary metabolites during seed germination and seedling establishment of the tree *Erythrina velutina* (Fabaceae). *Revista de Biologia Tropical*, 71, 1–16.

<https://doi.org/10.15517/REV.BIOL.TROP.V71I1.49004>

1–12. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-2282-0>

- Bolaños-Cardet, J., Pepió-Tárrega, B., Saiz-Poseu, J., López-Moral, A., Ullah, F., Yuste, V. J., Ruiz-Molina, D., & Suárez-García, S. (2026). The redox properties of polyphenols and their role in ROS generation for biomedical applications. In *Angewandte Chemie - International Edition*, 65, 1–40. Wiley-VCH GmbH. <https://doi.org/10.1002/anie.202513698>
- Borrelli, A., Zamani, F., Logegaray, V. R., Sanchez, E. C., Maseda, F. A., del Corazón de Jesús Alonso Quintas, J. M., & Paradiso, R. (2026). Manipulation of light intensity and spectrum for driving growth and metabolism to improve nutritional and nutraceutical quality of microgreens. *Plant Growth Regulation*, 106(26), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10725-026-01434-7>
- Brazaitytė, A., Miliauskienė, J., Vaštakaitė-Kairienė, V., Sutulienė, R., Laužikė, K., Duchovskis, P., & Małek, S. (2021). Effect of different ratios of blue and red led light on brassicaceae microgreens under a controlled environment. *Plants*, 10(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants10040801>
- Congpei, Y., Cheng, T., Congcong, C., Weixin, D., & Yuechen, Z. (2025). Research progress on the effects of red and blue light on plant photosynthetic carbon assimilation and growth and development. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 36(7), 2246–2256. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202507.007>
- Frede, K., Winkelmann, S., Busse, L., & Baldermann, S. (2023). The effect of LED light quality on the carotenoid metabolism and related gene expression in the genus *Brassica*. *BMC Plant Biology*, 23(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04326-4>
- Gao, S., Liu, X., Liu, Y., Cao, B., Chen, Z., & Xu, K. (2020). Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of welsh onion (*Allium fistulosum* L.) grown under different LED wavelengths. *BMC Plant Biology*, 20(78), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-2282-0>
- Gogoi, B., Dutta, S., Saikia, T., Saikia, R., Borthakur, S., & Neog, M. (2025). Microgreens for nutritional resilience: A comprehensive review. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(7), 923–927. <https://doi.org/10.33545/2618060x.2025.v8.i7l.3305>
- Haghighi, M., Moradian, M. R., Mozafarian, M., & Geösel, A. (2025). The nutritional value, biochemical traits, and growth of brassica oleracea grown under red, blue, and combined red–blue LED lighting. *Plants*, 14(23), 1–25. <https://doi.org/10.3390/plants14233700>
- Jasenovska, L., Brestic, M., Barboricova, M., Ferencova, J., Filacek, A., & Zivcak, M. (2024). Analysis of the effects of various light spectra on microgreen species. *Folia Horticulturae*, 36(2), 197–209. <https://doi.org/10.2478/fhort-2023-0012>
- Kalal, D., Verma, S., & Solanki, H. A. (2021). Microgreen-as a potential food source: A review. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 9(3), 2839–2845.
- Kim, J. S., Cuong, D. M., Bae, Y. Bin, & Cho, S. K. (2022). Antioxidant and antiproliferative activities of solvent fractions of broccoli (*Brassica oleracea* L.) sprout. *Applied Biological Chemistry*, 65(34), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13765-022-00700-2>
- Kumar, D., Singh, H., Bhatt, U., Sharma, J., Sharma, S., & Soni, V. (2022). Physiological performance of *Mimosa pudica* L. under different light quality and photoperiods. *Physiologia*, 2(4), 132–153. <https://doi.org/10.3390/physiologia2040012>
- Kusuma, P., Mitchell Westmoreland, F., Zhen, S., & Bugbee, B. (2021). Photons from NIR LEDs can delay flowering in short-day soybean and Cannabis: Implications for phytochrome activity. *PLoS ONE*, 16(7), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255232>

- Le, T. N., Chiu, C. H., & Hsieh, P. C. (2020). Bioactive compounds and bioactivities of *Brassica oleracea* L. var. *italica* sprouts and microgreens: An updated overview from a nutraceutical perspective. *Plants*, 9(8), 1–23. <https://doi.org/10.3390/plants9080946>
- Leonardelli, M., Tissot, N., Podolec, R., Ares-Orpel, F., Glauser, G., Ulm, R., & Demarsy, E. (2024). Photoreceptor-induced sinapate synthesis contributes to photoprotection in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 196(2), 1518–1533. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae352>
- Liu, C.-C., Chi, C., Jin, L.-J., Zhu, J., Yu, J.-Q., & Zhou, Y.-H. (2017). The bZip transcription factor HY5 mediates CRY1a-induced anthocyanin biosynthesis in tomato. *Plant Cell and Environment*, 41, 1762–1775.
- Liu, X. Y., Jiao, X. L., Chang, T. T., Guo, S. R., & Xu, Z. G. (2018). Photosynthesis and leaf development of cherry tomato seedlings under different LED-based blue and red photon flux ratios. *Photosynthetica*, 56(4), 1212–1217. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0814-8>
- Lucas, B. N., Dalla Nora, F. M., Boeira, C. P., Verruck, S., & Da Rosa, C. S. (2022). Determination of total phenolic compounds in plant extracts via Folin-Ciocalteu's method adapted to the usage of digital images. *Food Science and Technology (Brazil)*, 42, 1–6. <https://doi.org/10.1590/fst.35122>
- Luo, L., Zhang, G., Liang, W., & Wu, D. (2024). Effects of LED light quality on broccoli microgreens plant growth and nutrient accumulation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(10), 3481–3489. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11326-7>
- Martínez-Moreno, A., Frutos-Tortosa, A., Díaz-Mula, H., Mestre, T. C., & Martínez, V. (2024). Effect of the intensity and spectral quality of LED light on growth and quality of spinach indoors. *Horticulturae*, 10(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040411>
- Matthews, J. S. A., Violet-Chabrand, S., & Lawson, T. (2020). Role of blue and red light in stomatal dynamic behaviour. *Journal of Experimental Botany*, 71(7), 2253–2269. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz563>
- Mishra, A. K., Choi, S.-J., & Baek, K.-H. (2020). Application of ultraviolet C irradiation for the increased production of secondary metabolites in plants. *The Journal of Animal and Plant Science*, 30(5), 1082–1091. <https://doi.org/https://doi.org/10.36899/JAPS.2020.5.0123>
- Muroddinova, F. R. gizi. (2025). Physiological foundations of photoperiodism and phytochrome system in plants. *Journal of Medical Genetics and Clinical Biology*, 2(6), 250–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.61796/jmgcb.v2i6.1338>
- Murthy, H. N., Joseph, K. S., Paek, K. Y., & Park, S. Y. (2024). Light as an elicitor for enhanced production of secondary metabolites in plant cell, tissue, and organ cultures. *Plant Growth Regulation*, 104, 31–49. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01139-9>
- Nurzyńska-Wierdak, R. (2025). Green leafy vegetables (GLVs) as nutritional and preventive agents supporting metabolism. *Metabolites*, 15(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/metabo15080502>
- Park, C. H., Park, Y. E., Yeo, H. J., Kim, J. K., & Park, S. U. (2020). Effects of light-emitting diodes on the accumulation of phenolic compounds and glucosinolates in *Brassica juncea* sprouts. *Horticulturae*, 6(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040077>
- Pavlović, S., Girek, Z., Damjanović, J., Nikolić, S. R., Stevanović, D., & Ugrinović, M. (2025). The influence of LED light on the development and antioxidant status of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) microgreens. *Horticultural Science*, 52(3), 272–280. <https://doi.org/10.17221/44/2024-HORTSCI>

- Pereira, A., Dias, M. I., Oliveira, M. B. P. P., & Pinela, J. (2026). Improving food security through indoor vertical farming of microgreens: A trendy fad or a promising solution? A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 10, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2026.1809881>
- Podśędek, A., Frąszczak, B., Sosnowska, D., Kajszczyk, D., Szymczak, K., & Bonikowski, R. (2023). LED light quality affected bioactive compounds, antioxidant potential, and nutritional value of red and white cabbage microgreens. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(9), 1–16. <https://doi.org/10.3390/app13095435>
- Proietti, S., Moscatello, S., Riccio, F., Downey, P., & Battistelli, A. (2021). Continuous lighting promotes plant growth, light conversion efficiency, and nutritional quality of *Eruca vesicaria* (L.) Cav. in controlled environment with minor effects due to light quality. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.730119>
- Qiao, J., Li, Z., Lv, Z., Liu, S., Chen, S., & Feng, Y. (2024). Effects of different combinations of red and blue light on the edible organ morphology and quality of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) microgreens. *Agronomy*, 14(4), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040751>
- Rahman, M. M., Field, D. L., Ahmed, S. M., Hasan, M. T., Basher, M. K., & Alameh, K. (2021). LED illumination for high-quality high-yield crop growth in protected cropping environments. *Plants*, 10(11), 1–23. <https://doi.org/10.3390/plants10112470>
- Rehman, M., Fahad, S., Saleem, M. H., Hafeez, M., Ur Rahman, M. H., Liu, F., & Deng, G. (2020). Red light optimized physiological traits and enhanced the growth of ramie (*Boehmeria nivea* L.). *Photosynthetica*, 58(4), 922–931. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.040>
- Sheerin, D. J., & Hiltbrunner, A. (2017). Molecular mechanisms and ecological function of far-red light signalling. *Plant, Cell and Environment*, 40, 2509–2529. <https://doi.org/10.1111/pce.12915>
- Singh, A., Ashoka, P., Nasima, Tyagi, V., Panotra, N., Kalpana, K., Mubeen, & Pandey, S. K. (2024). A comparative analysis of land, water and energy requirements for hydroponic and conventional cultivation of horticultural crops. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(9), 771–784. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i92404>
- Smith, M. D., & Karunadasa, H. I. (2018). White-light emission from layered halide perovskites. *Accounts of Chemical Research*, 15(3), 619–627. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00433>
- Soltanbeigi, E., & Lysiuk, R. (2026). A concise review on ultraviolet radiation and its potential to enhance the pharmacological profile of medicinal plants via secondary metabolite production. *Plant Biotechnology Persa*, 8(1), 1–7. <https://doi.org/10.61882/pbp.8.1.14>
- Tabbert, J. M., Schulz, H., & Krähmer, A. (2021). Increased plant quality, greenhouse productivity and energy efficiency with broad-spectrum led systems: A case study for thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Plants*, 10(5), 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants10050960>
- Takao, L. K., Imatomi, M., & Gualtieri, S. C. J. (2015). Antioxidant activity and phenolic content of leaf infusions of *Myrtaceae* species from Cerrado (Brazilian savanna). *Brazilian Journal of Biology*, 75(4), 948–952. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.03314>
- Talukder, P. (2020). Regulation of induction of phenylalanine ammonia lyase and its role in production of phenolic compounds in plants. *International Journal of Current Research in Biosciences and Plant Biology*, 7(6), 55–63. <https://doi.org/10.20546/ijcrbp.2020.706.006>
- Toscano, S., Cavallaro, V., Ferrante, A., Romano, D., & Patané, C. (2021). Effects of different light spectra on final biomass

- production and nutritional quality of two microgreens. *Plants*, 10(8), 1–18. <https://doi.org/10.3390/plants10081584>
- Tsai, S. R., & Hamblin, M. R. (2017). Biological effects and medical applications of infrared radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 170, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.04.014>
- Vidović, M., Morina, F., & Jovanović, S. V. (2017). *Stimulation of various phenolics in plants under ambient uv-b radiation*. In V. P. Singh, S. Singh, S. M. Prasad, & P. Parihar (Eds.), *UV-B Radiation* (pp. 9–56). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119143611.ch2>
- Wu, X., Zhu, S., He, L., Cheng, G., Li, T., Meng, W., & Wen, F. (2025). Phenylalanine ammonia-lyase: A core regulator of plant carbon metabolic flux redistribution—from molecular mechanisms and growth modulation to stress adaptability. *Plants*, 14(24), 1–28. <https://doi.org/10.3390/plants14243811>
- Xu, J., Nie, S., Xu, C.-Q., Liu, H., Jia, K.-H., Zhou, S.-S., Zhao, W., Zhou, X.-Q., El-Kassaby, Y. A., Wang, X.-R., & Mao, J.-F. (2021). UV-B-induced molecular mechanisms of stress physiology responses in the major northern Chinese conifer *Pinus tabulaeformis* Carr. *Tree Physiology*, 41(7), 1247–1263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa180>
- Yang, J., Song, J., & Jeong, B. R. (2022). The flowering of SDP *Chrysanthemum* in response to intensity of supplemental or night-interruptional blue light is modulated by both photosynthetic carbon assimilation and photoreceptor-mediated regulation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.981143>
- Yulkifli, Kahar, P., Ramli, R., Etika, S. B., & Imawan, C. (2019). Development of color detector using colorimetry system with photodiode sensor for food dye determination application. *Journal of Physics: Conference Series*, 1185(1), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1185/1/012031>
- Zaghdoud, C., Yahia, Y., Debouba, M., & Martinez-Ballesta, M. D. C. (2026). Monochromatic red light effects on plants under optimal and saline environments: a comprehensive review of photobiological mechanisms and adaptive responses. *Horticulturae*, 12(2), 1–37. <https://doi.org/10.3390/horticulturae12020153>
- Zagoskina, N. V., Zubova, M. Y., Nechaeva, T. L., Kazantseva, V. V., Goncharuk, E. A., Katanskaya, V. M., Baranova, E. N., & Aksenova, M. A. (2023). Polyphenols in plants: Structure, biosynthesis, abiotic stress regulation, and practical applications (Review). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 1–25. <https://doi.org/10.3390/ijms241813874>
- Zhang, S., Zhang, L., Zou, H., Qiu, L., Zheng, Y., Yang, D., & Wang, Y. (2021). Effects of light on secondary metabolite biosynthesis in medicinal plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.781236>
- Zhuang, L., Huang, G., Li, X., & Xiao, J. (2022). Effect of different LED lights on aliphatic glucosinolates metabolism and biochemical characteristics in broccoli sprouts. *Food Research International*, 154(7), 111057. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111057>