

Pengaruh Cahaya Artifisial terhadap Karakter Morfologi dan Genetik *Bacopa caroliniana* dalam Kultur Jaringan

Artificial Light Effects on Morphological and Genetic Traits of Bacopa caroliniana in Tissue Culture

Syakhрил Alam¹⁾, Laela Sari^{2*)}, Nonon Saribanon¹⁾, Wening Enggarini³⁾,
Nurhamidar Rahman²⁾, Evan Maulana²⁾, Amalia Prihaningsih⁴⁾

¹⁾Program Studi Magister Biologi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Nasional, Jakarta, Indonesia

²⁾Pusat Riset Botani Terapan, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jawa Barat, Indonesia.

³⁾Pusat Riset Rekayasa Genetika, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jawa Barat, Indonesia

⁴⁾Fungsi Pengelolaan Layanan Laboratorium Genomik-Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset dan Kawasan Sains dan Teknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jawa Barat, Indonesia

^{*)}E-mail korespondensi: lael002@brin.go.id

Diajukan: 11 Februari 2025 **Diterima:** 27 Oktober 2025 **Dipublikasi:** 28 November 2025

ABSTRACT

Bacopa caroliniana has great potential in the fields of ecology, medicinal and ornamental, also has aesthetic value in the form of very rare small blue flowers. This beauty is highly sought after among aquatic lovers, for that genetic diversity is needed using the light spectrum. However, understanding of the influence of light spectrum on the growth and genetic characters of *B. caroliniana* using tissue culture. The research was carried out from March 2023 to January 2024 at the KST Soekarno National Research and Innovation Agency Laboratory, Cibinong, Bogor. Explants were grown in MS media (Murashige and Skoog) treated with white (control), blue, red and purple LED light. The design used in this research was a Completely Randomized Design (CRD) with one factor and six replications. Observations include plant height, number of leaves, number of axillary shoots, number of roots, as well as genetic analysis through DNA extraction, PCR and sequencing. The results showed that white light gave the best results on all morphological parameters, with the highest number of leaves (30,800), while purple light produced the lowest number of leaves (17,500). The ANOVA test showed that plant height did not differ significantly between treatments (Sig. = 0.137), indicating the adaptability of *B. caroliniana* to various light spectra. The research conclusions show that white light is optimal for increasing leaf number and photosynthetic capacity, which is highly relevant in tissue culture and aquaculture applications. Genetically, blue and white light treatment did not cause significant genetic changes, while red and purple light showed slight, temporary genetic changes, possibly influenced by epigenetic mechanisms.

Keywords: *Bacopa caroliniana*; genetic; in vitro; light spectrum; photosynthesis

ABSTRAK

Bacopa caroliniana memiliki potensi besar di bidang ekologi, medisinal, dan ornamental, juga memiliki nilai estetika berupa bunga biru kecil yang sangat langka. Keindahan ini

sangat dicari kalangan pecinta akuatik, untuk itu perlu keragaman genetika menggunakan spektrum cahaya. Namun pemahaman mengenai pengaruh spektrum cahaya terhadap pertumbuhan dan karakteristik genetika *Bacopa* masih terbatas, terutama dalam kultur jaringan menggunakan cahaya LED. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh spektrum cahaya buatan terhadap pertumbuhan morfologi dan karakter genetika *B. caroliniana* secara *in vitro*. Penelitian dilaksanakan dari Maret 2023 hingga Januari 2024 di Laboratorium Badan Riset dan Inovasi Nasional KST Soekarno, Cibinong, Bogor. Eksplan ditanam di media MS (Murashige and Skoog) dengan perlakuan cahaya LED putih (kontrol), biru, merah, dan ungu. Rancangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan satu faktor dan enam ulangan. Pengamatan meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, jumlah tunas ketiak, jumlah akar, serta analisis genetika melalui ekstraksi DNA, PCR, dan sekuensing. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cahaya putih memberikan hasil terbaik pada semua parameter morfologi, dengan jumlah daun tertinggi (30.800), sementara cahaya ungu menghasilkan jumlah daun terendah (17.500). Uji ANOVA menunjukkan bahwa tinggi tanaman tidak berbeda signifikan antar perlakuan (Sig. = 0,137), mengindikasikan adaptabilitas *B. caroliniana* terhadap berbagai spektrum cahaya. Kesimpulan penelitian menunjukkan bahwa cahaya putih optimal untuk meningkatkan jumlah daun dan kapasitas fotosintesis, yang sangat relevan dalam aplikasi kultur jaringan dan akuakultur. Secara genetika, perlakuan cahaya biru dan putih tidak menyebabkan perubahan genetika signifikan, sedangkan cahaya merah dan ungu menunjukkan sedikit perubahan genetika yang bersifat sementara, kemungkinan dipengaruhi oleh mekanisme epigenetik.

Kata kunci: *Bacopa caroliniana*; fotosintesis; genetika; *in vitro*; spektrum cahaya

PENDAHULUAN

Bacopa caroliniana, atau lemon bacopa, adalah tanaman akuatik yang memiliki nilai ekologi, medisinal, dan ornamental yang signifikan. Tanaman ini tidak hanya memperindah taman air dan digunakan secara luas dalam desain *aquascape*, tetapi juga menyediakan habitat bagi makhluk air, mendukung proyek restorasi lahan basah, dan memiliki berbagai manfaat pengobatan tradisional. Secara medis, *B. caroliniana* diketahui berkhasiat sebagai pencakar, diuretik, penenang, tonik saraf, dan katarsis, serta mampu mengobati masalah pernapasan seperti batuk kronis dan sesak napas. Selain itu, tanaman ini mengandung senyawa dengan aktivitas antimikroba dan berpotensi sebagai insektisida (Gettys and Torre 2015; Liu *et al.*, 2019; Izzah *et al.*, 2022; Walter 2023).

Permasalahan

Meskipun *B. caroliniana* memiliki potensi, pemahaman tentang pengaruh faktor lingkungan khususnya cahaya terhadap pertumbuhannya masih terbatas. Tanaman air, termasuk *B. caroliniana*, memiliki adaptasi khusus untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya,

seperti pengembangan struktur daun yang besar dan tipis (Bornette and Puijalon 2011). Penelitian pada tanaman lain, seperti kubis ungu, menunjukkan bahwa kombinasi cahaya tertentu dapat meningkatkan efisiensi fotosintesis dan kualitas nutrisi (Yang *et al.*, 2016). Namun, penelitian tentang pengaruh spektrum cahaya terhadap *B. caroliniana*, terutama dalam kultur jaringan menggunakan cahaya artifisial, masih minim. Cahaya memainkan peran penting dalam kultur jaringan dan pertumbuhan tanaman. Berikut beberapa aspek yang dipengaruhi oleh cahaya adalah fotosintesis, pertumbuhan dan perkembangan, regulasi hormonal dan morfogenesis. Dalam kultur jaringan, cahaya dapat digunakan untuk mengatur pertumbuhan: Cahaya dapat digunakan untuk mengatur pertumbuhan dan perkembangan tanaman dalam kultur jaringan. Meningkatkan efisiensi: Cahaya dapat meningkatkan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan tanaman dalam kultur jaringan.

Cahaya artifisial, terutama teknologi LED (*Light Emitting Diode*), telah menjadi alternatif yang efektif untuk mendukung fotosintesis tanaman di lingkungan dengan

keterbatasan sinar matahari (Anindito *et al.*, 2018). Teknologi ini memungkinkan penyesuaian kualitas cahaya sesuai kebutuhan spesies tanaman (Johkan *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2023). Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi dampak spesifik spektrum cahaya seperti putih, biru, merah, dan ungu terhadap pertumbuhan serta karakter genetik *B. caroliniana*.

Meskipun telah ada penelitian tentang pengaruh spektrum cahaya terhadap berbagai spesies tanaman lain, penelitian mengenai pengaruh cahaya artifisial pada *B. caroliniana* dalam kultur jaringan masih sangat terbatas. Oleh karena itu, masih banyak aspek yang perlu dieksplorasi terkait hal tersebut. Secara khusus, belum terdapat kajian yang membahas dampak spesifik dari cahaya putih, biru, merah, dan ungu terhadap pertumbuhan dan karakteristik genetik *B. caroliniana*, baik dalam konteks *aquascape* maupun aplikasi farmasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan karakter morfofisiologis *B. caroliniana* setelah diberikan perlakuan cahaya putih, biru, merah, dan ungu, serta menganalisis perubahan karakter genetik *B. caroliniana* setelah diberikan perlakuan cahaya yang sama.

Penelitian ini didasarkan pada dua hipotesis. Pertama, spektrum cahaya (putih, biru, merah, dan ungu) akan menghasilkan perbedaan signifikan dalam parameter pertumbuhan *B. caroliniana*. Kedua, spektrum cahaya (putih, biru, merah, dan ungu) diperkirakan akan menghasilkan perbedaan signifikan dalam karakter genetik *B. caroliniana*.

Untuk mengatasi keterbatasan pemahaman tentang pengaruh spektrum cahaya terhadap *B. caroliniana*, diperlukan serangkaian penelitian eksperimen menggunakan cahaya artifisial, seperti putih, biru, merah, dan ungu, dalam kultur jaringan. Aplikasi dari hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi kultur jaringan, baik untuk keperluan *aquascape* maupun farmasi serta menghasilkan informasi praktis tentang spektrum cahaya optimal untuk mendukung pertumbuhan *B. caroliniana* di berbagai kondisi lingkungan. Dengan demikian, analisis genetik pada tanaman kultur jaringan dengan percobaan pencahayaan

dapat membantu meningkatkan pemahaman tentang respons tanaman terhadap cahaya dan mengoptimalkan kondisi pencahayaan untuk meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret 2023 sampai dengan Januari 2024 di Laboratorium Kultur Jaringan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), BRIN KST (Kawasan Sains Terpadu) Soekarno – Cibinong, Bogor.

Penelitian ini menggunakan batang berupa ruas tanaman *B. caroliniana* dengan ukuran ± 1 cm yang ditumbuhkan pada media padat Murashige and Skoog (MS) dengan konsentrasi 4,43 g/ yang diberi gula pasir 30gr/L tanpa hormon dan kondisi pH 5,8. Media dibuat secara aseptik dengan cara sterilisasi autoclave pada suhu 121°C, tekanan 15 psi selama 20 menit. Kondisi pada lingkungan kultur diatur pada suhu 25 $\pm$ 2°C, kelembaban 60–70%, dan pencahayaan 12 jam terang dan 12 jam gelap. Jarak lampu dengan botol kultur ± 25 cm. Bahan dan alat yang digunakan mencakup bahan dan peralatan untuk pembuatan media kultur jaringan, lampu LED putih sebagai kontrol (panjang gelombang 380–780 nm), biru (panjang gelombang 400–450 nm), ungu (panjang gelombang 380–450 nm), dan merah (panjang gelombang 600–700 nm)- serta peralatan untuk ekstraksi DNA, *Polymerase Chain Reaction* (PCR), dan sekuensing. *B. caroliniana* dikenai perlakuan cahaya berbeda menggunakan lampu LED putih, biru, ungu, dan merah, yang dipasang pada rak khusus dan dibatasi oleh kain hitam untuk menghindari kontaminasi cahaya antar perlakuan. Analisis molekuler dilakukan dengan ekstraksi DNA dari jaringan daun menggunakan Wizard® SV Genomic DNA Purification System. Amplifikasi DNA ditargetkan pada gen *rbcL* (ribulose-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit). Proses PCR dilakukan menggunakan primer universal *rbcL*. Produk PCR kemudian dipurifikasi dan dianalisis melalui proses sekuensing dua arah.

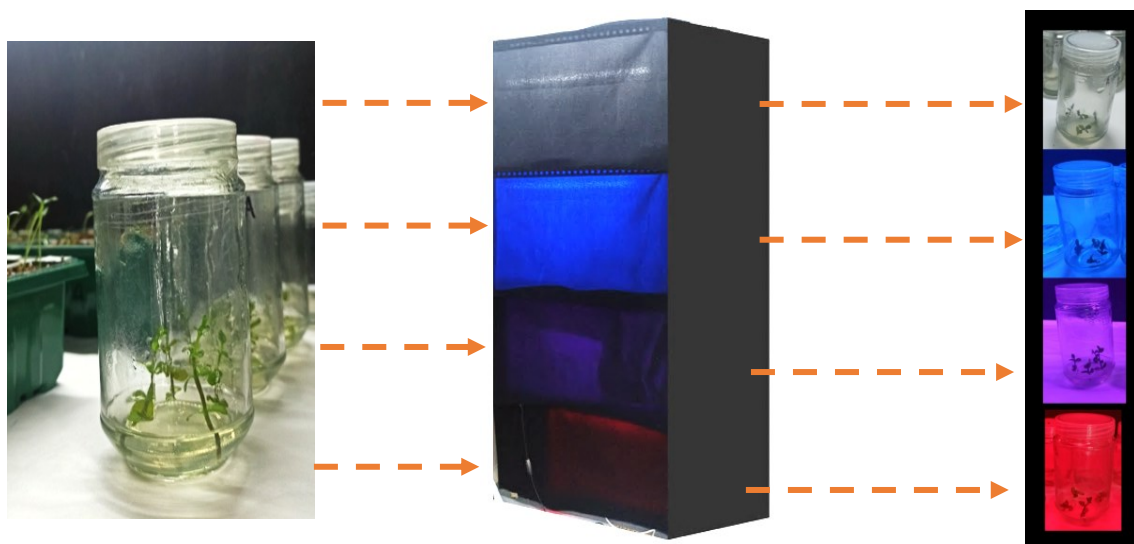
Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan satu faktor, yaitu jenis cahaya yang terdiri dari empat perlakuan: cahaya putih, cahaya biru, cahaya ungu, dan cahaya merah. Setiap perlakuan diulang sebanyak enam kali ($N = 6$), dengan setiap ulangan berisi empat tanaman *B. caroliniana*. Total eksplan yang digunakan dalam percobaan ini adalah 96 tanaman ($4 \text{ tanaman} \times 6 \text{ ulangan} \times 4 \text{ perlakuan} = 96 \text{ tanaman}$). Perlakuan cahaya diberikan secara kontinu dengan pola pencahayaan 12 jam terang dan 12 jam gelap selama 10 bulan, untuk meniru siklus siang dan malam guna mengamati efek jangka panjang cahaya terhadap pertumbuhan tanaman. Tanaman ditempatkan pada rak yang terpisah sesuai dengan perlakuan cahaya yang diberikan, dan setiap rak ditutupi dengan kain hitam untuk memastikan hanya cahaya yang diinginkan yang mengenai tanaman. Dengan demikian, setiap kelompok perlakuan menerima cahaya yang sesuai, sementara kondisi lingkungan lainnya dijaga agar tetap seragam.

Pengamatan morfologi dilakukan tiap bulan sampai umur 6 bulan setelah tanam meliputi jumlah daun, tinggi tanaman, jumlah akar dan jumlah tunas ketiak. Jumlah daun dihitung berdasarkan total daun pada setiap

tanaman tiap bulan. Tinggi tanaman diukur dari pangkal batang hingga ujung daun tertinggi, jumlah akar dihitung dari akar yang muncul yang ada pada setiap tanaman. Tunas ketiak dihitung berdasarkan total tunas yang terbentuk. Semua pengamatan dilakukan diluar botol kultur.

Data yang diperoleh dianalisis secara statistik dengan membandingkan rata-rata antar kelompok menggunakan uji Tukey HSD (*Honest Significant Difference*) melalui aplikasi SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) pada signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Sebelum analisis dilakukan uji normalitas untuk memastikan data terdistribusi normal, uji homogenitas untuk memeriksa kesamaan varians antar kelompok, dan uji ANOVA untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan signifikan antar kelompok perlakuan.

Pengujian DNA dilakukan pada saat tanaman berumur 6, 8, dan 10 bulan. Tahapan kegiatannya meliputi ekstraksi DNA menggunakan kit Wizard Promega, pengujian kualitas dan kuantitas menggunakan Nanodrop, penggandaan DNA dengan PCR dengan primer RbCL, dan sekuensing. Hasil sekuensing dilanjutkan dengan pembuatan pohon filogenetik untuk pengaruh perlakuannya menggunakan aplikasi Mega 11.



Gambar 1. Rak Perlakuan cahaya terhadap kultur invitro *B. caroliniana*

HASIL DAN PEMBAHASAN

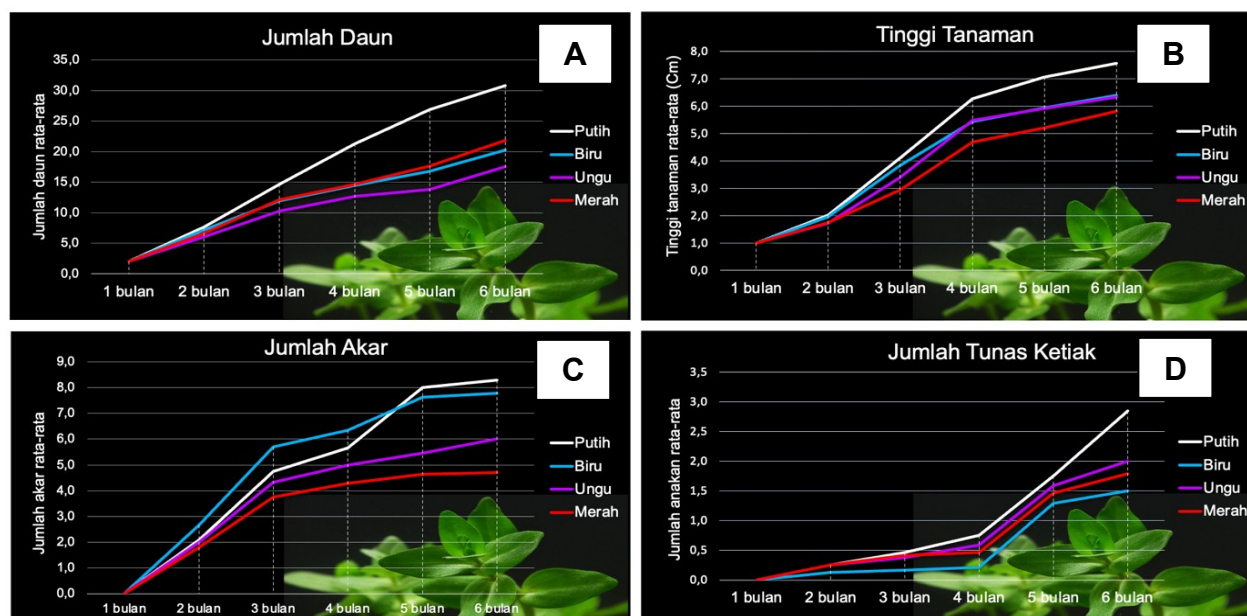
Berdasarkan data (Tabel. 1, Gambar. 2), diketahui bahwa secara rata-rata, respons *B. caroliniana* terhadap cahaya bervariasi. Pertumbuhan *B. caroliniana*

dimulai dengan pertumbuhan daun dan tinggi tanaman pada bulan pertama, diikuti dengan pembentukan akar pada bulan kedua lalu pembentukan tunas ketiak.

Tabel 1. Rata-rata jumlah daun, tinggi tanaman, jumlah akar dan jumlah tunas ketiak *B. caroliniana* Pengamatan pada bulan ke 1 sampai bulan ke 6 pada perlakuan cahaya putih, biru, ungu dan merah.

No.	Parameter	Perlakuan	Pengamatan pada bulan ke					
			1	2	3	4	5	6
1	Jumlah Daun	Putih	2	8	15	21	27	31
		Biru	2	7	12	15	17	20
		Ungu	2	6	10	13	14	18
		Merah	2	7	12	15	18	22
2	Tinggi Tanaman	Putih	1,0	2,0	4,1	6,3	7,0	7,6
		Biru	1,0	2,0	3,8	5,4	5,9	6,4
		Ungu	1,0	1,7	3,4	5,5	5,9	6,3
		Merah	1,0	1,8	2,9	4,7	5,2	5,8
3	Jumlah Akar	Putih	0	2	5	6	8	8
		Biru	0	3	6	6	8	8
		Ungu	0	2	4	5	6	6
		Merah	0	2	4	4	5	5
4	Jumlah Tunas ketiak	Putih	0	0	1	1	2	3
		Biru	0	0	0	0	1	2
		Ungu	0	0	0	1	2	2
		Merah	0	0	0	1	2	2

Keterangan: Tinggi tanaman diukur dalam satuan sentimeter (cm).



Gambar 2. Grafik A= jumlah daun, B= tinggi tanaman (cm), C= jumlah akar dan D= jumlah tunas ketiak pada *B. caroliniana* setelah perlakuan cahaya usia 1 hingga 6 bulan. Pada bulan ke 6 diperoleh rata-rata sebagai berikut:

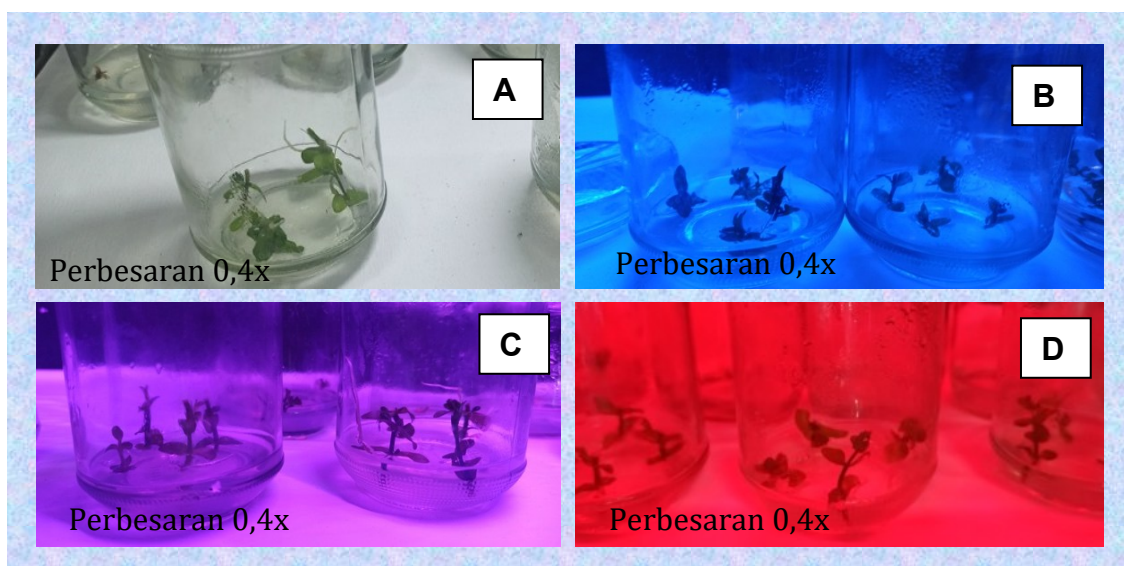
- A= putih $31 \pm 3,7$; biru $20 \pm 3,0$; ungu $18 \pm 4,7$; merah $22 \pm 4,2$.
- B= putih $7,6 \pm 1,0$; biru $6,4 \pm 1,2$; ungu $6,3 \pm 1,2$; merah $5,8 \pm 1,2$.
- C= putih $8 \pm 1,4$; biru $8 \pm 2,5$; ungu $6 \pm 0,6$; merah $5 \pm 1,3$.
- D= putih $3 \pm 0,3$; biru $2 \pm 0,5$; ungu $2 \pm 0,7$; merah $2 \pm 0,5$.

Berdasarkan Gambar 2 terlihat bahwa pertumbuhan daun dan peningkatan tinggi tanaman berjalan seiring pada satu bulan pertama. Namun, mulai bulan kedua hingga keenam terjadi peningkatan sampai pada bulan ke enam. Perlakuan cahaya putih menunjukkan nilai tertinggi pada semua parameter yang diamati (jumlah daun, tinggi tanaman, jumlah akar, dan jumlah tunas ketiak). Berikut ini adalah gambar kondisi *B. Caroliniana* saat usia satu bulan (Gambar 3).

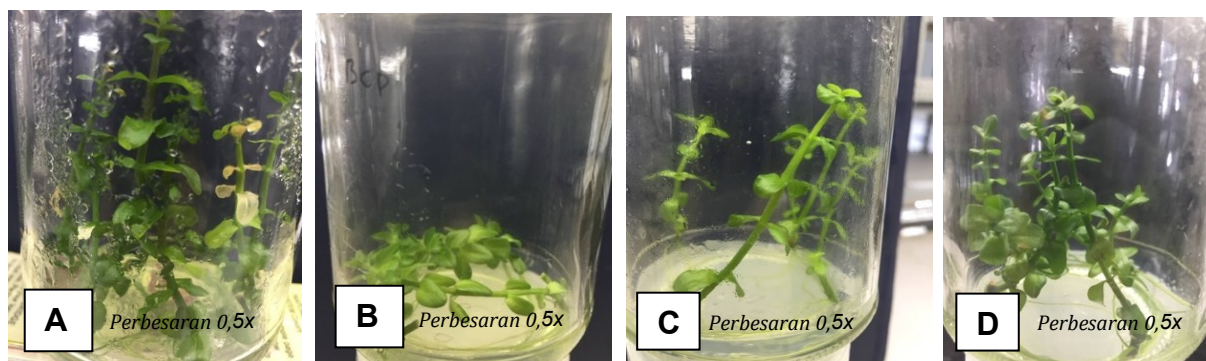
Pembentukan akar sudah terlihat pada bulan kedua sedangkan tunas ketiak baru mulai tumbuh. Pada bulan kelima dan keenam, perbedaan pertumbuhan tanaman pada setiap perlakuan semakin jelas. Perlakuan cahaya ungu menunjukkan nilai terendah pada jumlah daun. Perlakuan cahaya merah menunjukkan nilai terendah

pada tinggi tanaman dan jumlah akar. Dan perlakuan cahaya biru memperlihatkan nilai terendah pada jumlah tunas ketiak.

Bulan kelima dan keenam, seluruh perlakuan menunjukkan perbedaan yang jelas secara visual. Perlakuan cahaya putih memberikan hasil pertumbuhan tanaman yang paling optimal pada jumlah daun, tinggi tanaman, jumlah akar dan jumlah tunas (Gambar 4A). Sebaliknya, perlakuan dengan cahaya biru cenderung menghasilkan arah pertumbuhan tanaman horizontal (Gambar 4B). Perlakuan dengan cahaya ungu dan merah, arah pertumbuhan tanaman tetap vertikal, namun terdapat perbedaan pada jumlah daun. Jumlah daun pada tanaman yang terkena cahaya ungu lebih sedikit dibandingkan dengan yang terkena cahaya merah (Gambar 4C, 4D).



Gambar 3. Pertumbuhan *B. caroliniana* saat berumur satu bulan berdasarkan perlakuan cahaya pada perbesaran 0,4x. Dimana A= perlakuan cahaya putih, B= perlakuan cahaya biru, C= perlakuan cahaya ungu dan D= perlakuan cahaya merah (D)



Gambar 4. *B. caroliniana* pada umur 6 bulan dimana A = cahaya putih, B = cahaya biru, C = cahaya ungu dan D = cahaya merah (perbesaran 0,5x)

Tabel 2. Hasil Uji Anova

Variabel	Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat (SS)	Derajat Bebas (df)	Kuadrat Tengah (MS)	F	Sig. (p-value)
Jumlah Daun	Antar kelompok	594,765	3	198,255	12,582	0,000
	Dalam kelompok	315,133	20	15,757		
Tinggi Tanaman (cm)	Antar kelompok	7,991	3	2,664	2,063	0,137
	Dalam kelompok	25,821	20	1,291		
Jumlah Akar	Antar kelompok	49,203	3	16,401	6,423	0,003
	Dalam kelompok	51,07	20	2,554		
Jumlah Tunas Ketiak	Antar kelompok	6,038	3	2,013	7,049	0,002
	Dalam kelompok	5,711	20	0,286		

Keterangan:

1. $p < 0,01$ berarti terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara kelompok perlakuan cahaya.
2. $p > 0,05$ menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara kelompok perlakuan cahaya.

Tabel 3. Uji Tukey HSD Terhadap Jumlah daun *B. caroliniana* 6 bulan setelah tanam

Cahaya	N	Subset untuk alpha = 0,05	
		1	2
Ungu	6	17,500	30,800
Biru	6	20,300	
Merah	6	21,833	
Putih	6		
Sig.		0,263	1,000

Keterangan: Subset yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan

Hasil analisis Anova mengungkapkan bahwa terdapat perbedaan sangat nyata ($P < 0,01$) antar jenis perlakuan cahaya terhadap jumlah daun, jumlah akar, dan jumlah tunas ketiak (Tabel. 2), untuk melihat perbedaan antar perlakuan dilanjutkan uji Tukey HSD. Berbeda dengan tinggi tanaman tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan (Tabel. 2).

Jumlah daun

Hasil analisis Tukey HSD (Tabel. 3) menunjukkan bahwa cahaya ungu menghasilkan jumlah daun terendah (17,5), diikuti oleh cahaya biru (20,3) dan merah (21,8), yang semuanya berada dalam subset 1, sehingga tidak ada perbedaan signifikan di antara ketiganya. Sebaliknya, cahaya putih menghasilkan jumlah daun tertinggi (30,8) dan berada dalam subset 2, yang terpisah secara signifikan dari ketiga kelompok cahaya lainnya (Gambar. 5). Dengan demikian, cahaya putih memberikan pengaruh paling besar terhadap peningkatan jumlah daun *B. caroliniana*.

Hasil ini memberikan wawasan tentang pengaruh kualitas cahaya terhadap morfologi daun *B. caroliniana*. Dalam konteks fisiologi tanaman, perbedaan jumlah daun yang signifikan antara cahaya putih dan cahaya lainnya dapat dijelaskan dengan mempertimbangkan bagaimana spektrum cahaya tertentu mempengaruhi proses fotosintesis, perkembangan morfologi, dan akumulasi biomassa pada tanaman. Penelitian selanjutnya, penggunaan cahaya putih dapat dipertimbangkan sebagai strategi untuk meningkatkan jumlah daun.

Fotosintesis dan Efisiensi Cahaya

Cahaya putih, yang mencakup panjang gelombang yang luas dari spektrum tampak, memberikan keuntungan besar untuk fotosintesis karena mencakup spektrum biru (450 nm) dan merah (660 nm), dua panjang gelombang yang paling efektif diserap oleh klorofil (Hogewoning *et al.* 2010; Kopsell *et al.* 2015). Fotosintesis yang lebih efisien memungkinkan tanaman menghasilkan energi lebih banyak dalam bentuk ATP dan NADPH, yang selanjutnya

digunakan dalam sintesis biomolekul penting, termasuk karbohidrat yang diperlukan untuk pembentukan daun baru. Hasil ini selaras dengan temuan Lee and Nam (2023) dan (Yan *et al.*, 2020), yang melaporkan bahwa kombinasi panjang gelombang cahaya yang seimbang meningkatkan kinerja fotosintesis dan akumulasi biomassa. Sebaliknya, cahaya ungu memiliki panjang gelombang dominan yang lebih pendek (400–420 nm), yang meskipun berenergi tinggi, tidak seefisien cahaya biru atau merah dalam mendorong fotosintesis (Lai *et al.*, 2022). Ini dapat menjelaskan mengapa tanaman yang tumbuh di bawah cahaya ungu menunjukkan jumlah daun terendah.

Respons Morfologis terhadap Kualitas Cahaya

Kualitas cahaya juga memengaruhi pembentukan daun melalui regulasi jalur pensinyalan fotoreseptor. Cahaya biru mengaktifkan kriptokrom dan fototropin, yang berperan dalam pembukaan stomata dan perluasan daun (Sellaro *et al.*, 2010; Tattini *et al.*, 2014). Cahaya merah, di sisi lain, merangsang fitokrom, yang memengaruhi respons fotomorfogenik seperti perluasan daun dan pemanjangan batang (Ouzounis *et al.*, 2015). Namun, tanpa dukungan panjang gelombang tambahan, masing-masing cahaya ini cenderung menghasilkan respons yang lebih terbatas dibandingkan cahaya putih yang mencakup spektrum lebih lengkap.

Jumlah daun yang lebih tinggi di bawah cahaya putih juga dapat dikaitkan dengan regulasi hormonal yang lebih efektif. Cahaya biru dan merah diketahui memengaruhi kadar auksin, sitokinin, dan giberelin, yang semuanya terlibat dalam pembentukan dan pertumbuhan daun (Johkan *et al.*, 2010; Randall and Lopez, 2015). Cahaya putih, biru, dan merah memengaruhi pertumbuhan tanaman melalui regulasi hormonal. Berikut hubungannya dengan auksin, sitokinin, dan giberelin. Auksin berperan dalam perpanjangan sel dan pembentukan akar. Cahaya biru dapat menghambat produksi auksin, sedangkan cahaya merah dapat meningkatkan produksinya. Sitokinin berperan dalam pembelahan sel dan

perkembangan daun. Cahaya biru dapat meningkatkan produksi sitokinin, yang mendukung pembentukan daun. Giberelin berperan dalam perpanjangan batang dan perkembangan bunga. Cahaya merah dapat memengaruhi produksi giberelin.

Akumulasi Biomassa dan Peran Daun dalam Pertumbuhan Tanaman

Sebagai organ utama fotosintesis, daun memainkan peran penting dalam mendukung pertumbuhan biomassa. Jumlah daun yang lebih banyak meningkatkan kapasitas fotosintesis total tanaman, yang pada gilirannya mendukung pembentukan akar dan tunas ketiak, sehingga *B. caroliniana* membentuk daun terlebih dahulu sebelum organ lainnya. Hal ini sesuai dengan model pertumbuhan tanaman di mana pembentukan biomassa didasarkan pada sumber energi dan karbon yang dihasilkan oleh daun (Cope and Bugbee 2013).

Implikasi

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan cahaya putih dapat menjadi pendekatan efektif pada lingkungan terkendali untuk meningkatkan jumlah daun *B. caroliniana*. Dengan jumlah daun yang lebih tinggi, tanaman memiliki kapasitas yang lebih besar untuk mendukung pertumbuhan biomassa dan kesehatan tanaman secara keseluruhan.

Penerapan LED cahaya putih dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi dalam lingkungan rumah kaca atau laboratorium (Jiang *et al.*, 2018; García-Caparrós *et al.*, 2020). Penggunaan cahaya putih juga memungkinkan manipulasi spektrum tambahan jika diperlukan untuk menargetkan respons spesifik, seperti akumulasi antosianin atau ketahanan terhadap stres lingkungan (Qin *et al.*, 2023).

Tinggi tanaman

Hasil uji ANOVA pada tinggi tanaman menunjukkan nilai signifikansi (Sig. = 0,137) lebih besar dari 0,05. Artinya, pada tingkat signifikansi 5%, tidak ada perbedaan yang signifikan dalam tinggi tanaman yang terpapar cahaya dengan warna yang berbeda. Ini berarti perlakuan cahaya putih, biru, ungu, dan merah secara statistik tidak

memengaruhi tinggi tanaman *B. caroliniana* secara signifikan. Meskipun terdapat berbagai warna cahaya yang diterapkan, tanaman tetap menunjukkan tingkat pertumbuhan tinggi yang serupa di semua perlakuan tersebut (Gambar 5). Dalam kondisi kekurangan cahaya, tanaman cenderung tumbuh lebih tinggi untuk mencari sumber cahaya (fototropisme). Kualitas cahaya, khususnya rasio cahaya merah terhadap cahaya inframerah, berdampak signifikan terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman, dengan rasio merah terhadap cahaya inframerah yang rendah mendorong pemanjangan dan mengurangi pertunasan (Fankhauser and Casal 2004; Fiorucci and Fankhauser 2017).

Fenomena fototropisme, di mana tanaman menunjukkan kecenderungan untuk tumbuh lebih tinggi untuk mencari cahaya, merupakan respons adaptif yang umum pada banyak spesies tanaman. Namun hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa perlakuan cahaya tersebut tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap tinggi tanaman *B. caroliniana* (Sig. = 0,137 > 0,05). Ini menunjukkan bahwa tanaman *B. caroliniana* dapat beradaptasi dengan baik terhadap berbagai spektrum cahaya, dan meskipun terdapat pemanjangan batang (fototropisme), tidak ada variasi tinggi tanaman yang signifikan.

Menurut studi Okazawa and Nishijima (2017), tanaman yang terpapar cahaya rendah sering kali mengalami pemanjangan batang untuk mencari cahaya. Namun, meskipun ada fenomena pemanjangan batang tersebut, hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman tidak selalu menunjukkan respons yang sama terhadap berbagai warna cahaya, terutama jika intensitas cahaya tidak cukup berpengaruh terhadap proses fisiologis tanaman. Tanaman yang terpapar cahaya rendah atau cahaya dengan kualitas yang tidak cukup dapat mengoptimalkan penangkapan cahaya dengan cara lain, seperti perubahan warna daun dan peningkatan luas daun (Silva *et al.*, 2016), meskipun tidak selalu disertai dengan perubahan tinggi yang signifikan.

Penting juga untuk mempertimbangkan faktor genetik dalam respons tanaman terhadap cahaya. Li *et al.*, (2024) menunjukkan bahwa tanaman memiliki gen yang mengatur respons terhadap stres cahaya rendah, termasuk pemanjangan batang. Kemungkinan besar faktor genetik tanaman *B. caroliniana* dalam kasus ini mendukung kemampuan beradaptasi dengan berbagai jenis cahaya, sehingga meskipun warna cahaya yang berbeda tidak mengubah tinggi tanaman secara signifikan.

Selain faktor genetik, faktor lingkungan seperti ketersediaan nutrisi dan kelembaban dapat memainkan peran penting dalam menentukan respons pertumbuhan tanaman terhadap cahaya. Sebagai contoh, tanaman dalam kondisi cahaya rendah dengan pasokan nutrisi yang memadai dapat menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan dengan tanaman yang kekurangan nutrisi (Hou *et al.* 2022). Oleh karena itu, hasil uji ANOVA yang menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan pada tinggi tanaman bisa dipengaruhi oleh faktor lingkungan lainnya yang tidak bervariasi antar perlakuan.

Fiorucci & Fankhauser (2017) dan Fankhauser and Casal (2004) menjelaskan bahwa kualitas cahaya, terutama rasio cahaya merah terhadap cahaya inframerah, dapat memengaruhi pertumbuhan dan pemanjangan batang. Namun, jika rasio cahaya merah terhadap cahaya inframerah dalam penelitian ini tidak cukup bervariasi antara perlakuan, maka respons tanaman terhadap pertumbuhan tinggi bisa jadi serupa di semua perlakuan yang digunakan.

Jumlah akar

Hasil analisis (Tabel. 4) menunjukkan bahwa cahaya merah menghasilkan jumlah akar terendah (4,7), berbeda signifikan dengan cahaya biru (7,8) dan putih (8,3). Cahaya ungu, dengan rata-rata 6,0, berada di posisi transisi karena tidak berbeda signifikan dengan cahaya merah pada subset 1, namun juga tidak berbeda signifikan dengan cahaya biru dan putih pada subset 2 (Gambar. 5).

Tabel 4. Uji Tukey HSD terhadap jumlah akar *B. caroliniana* 6 bulan setelah tanam

Cahaya	N	Subset untuk alpha = 0,05	
		1	2
Merah	6	4,733	
Ungu	6	6,000	6,000
Biru	6		7,817
Putih	6		8,333
Sig.		0,530	0,086

Keterangan: Subset yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan

Secara statistik, tidak ada perbedaan signifikan antara cahaya merah dan ungu (nilai signifikansi 0,530) serta antara cahaya ungu, biru, dan putih pada subset 2 (nilai signifikansi 0,086) pada tingkat signifikansi alpha 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan jumlah akar antara cahaya ungu, biru, dan putih dalam subset 2 bersifat tidak signifikan.

Cahaya merah diketahui cenderung merangsang pertumbuhan vegetatif, sedangkan cahaya biru lebih berperan dalam pembentukan akar dan perkembangan daun (Setyati *et al.* 2020; Cartika *et al.*, 022). Hasil ini sejalan dengan studi yang menunjukkan bahwa cahaya biru memberikan efek positif pada pembentukan akar dibandingkan dengan cahaya merah. Cahaya putih juga memberikan jumlah akar tertinggi (8,333), mendukung pernyataan bahwa spektrum cahaya campuran dapat memberikan hasil yang optimal. Penelitian oleh Setyati *et al.* (2020) juga mengungkap bahwa panjang gelombang campuran, seperti cahaya putih, dapat mendukung pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan dengan spektrum tunggal.

Cahaya ungu, yang merupakan kombinasi dari panjang gelombang merah dan biru, menunjukkan posisi transisi dalam hasil analisis. Hal ini mendukung penelitian Samur *et al.* (2023) yang mencatat bahwa kombinasi cahaya merah dan biru dapat meningkatkan biomassa tanaman, termasuk efisiensi pembentukan akar. Karena cahaya merah memiliki panjang gelombang 600-700 nm yang berperan untuk merangsang pertumbuhan vegetatif dengan meningkatkan hormon auksin, sedangkan

warna biru mempunyai panjang gelombang 400-500 nm yang berperan dalam pembentukan akar dan daun dengan mengatur hormon sitokinin dan etilen.

Jumlah tunas ketiak

Berdasarkan hasil analisis Tukey HSD setelah *B. caroliniana* mencapai umur enam bulan (Tabel 5.), ditemukan bahwa setiap perlakuan cahaya memiliki dampak yang berbeda pada rata-rata jumlah tunas ketiak.

Cahaya biru, dengan rata-rata jumlah tunas ketiak sebesar 1,5, berada pada subset 1 dan tidak berbeda signifikan dengan cahaya merah yang memiliki rata-rata 1,8. Berdasarkan hasil penelitian ini bahwa cahaya biru berperan dalam pembentukan akar sehingga memiliki jumlah tunas ketiak lebih sedikit dibandingkan cahaya merah. Cahaya merah berperan dalam merangsang pertumbuhan sel sehingga jumlah ketiak daun lebih banyak dibandingkan cahaya biru. Penelitian menunjukkan bahwa cahaya biru (450-495 nm) dapat meningkatkan efisiensi fotosintesis dan sintesis klorofil, serta merangsang pertumbuhan vegetatif seperti daun (Santoso dan Suhardjono 2020; Herwitarahman *et al.*, 2021). Demikian pula, cahaya merah (600-700 nm) memainkan peran dalam meningkatkan panjang batang dan luas daun yang mendukung pembentukan tunas ketiak (Supriani *et al.*, 2021; Ramadani *et al.*, 2024). Ketidaksignifikanan perbedaan ini menunjukkan bahwa kedua spektrum tersebut memiliki efek serupa dalam merangsang pembentukan tunas ketiak *B. caroliniana*.

Tabel 5. Uji Tukey HSD terhadap jumlah tunas ketiak *B. caroliniana* 6 bulan setelah tanam

Cahaya	N	Subset untuk alpha = 0.05	
		1	2
Biru	6	1,500	
Merah	6	1,792	
Ungu	6	2,000	2,000
Putih	6		2,847
Sig.		0,390	0,056

Keterangan: Subset yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan

Cahaya ungu, dengan panjang gelombang 380-450 nm, memiliki rata-rata jumlah tunas ketiak 2,0 dan menempati dua subset, yaitu subset 1 dan subset 2. Hal ini menjadikan cahaya ungu sebagai titik transisi, di mana pengaruhnya terhadap pembentukan tunas ketiak tidak signifikan berbeda dengan cahaya merah pada subset 1 tetapi mulai menunjukkan perbedaan signifikan dengan cahaya putih pada subset 2. Cahaya ungu dikenal meningkatkan sintesis pigmen seperti antosianin yang dapat membantu tanaman bertahan di bawah kondisi stres lingkungan (Arifah *et al.*, 2019).

Cahaya putih memiliki rata-rata jumlah tunas ketiak tertinggi, yaitu 2,85, dan hanya berada pada subset 2. Hal ini menunjukkan bahwa cahaya putih berbeda signifikan dengan semua perlakuan lainnya, termasuk cahaya biru, merah, dan ungu. Cahaya putih yang mencakup semua panjang gelombang cahaya tampak memberikan spektrum yang lengkap untuk fotosintesis, sehingga memungkinkan proses metabolik tanaman berjalan lebih optimal. Aktivitas stomata yang lebih tinggi pada perlakuan cahaya putih juga dapat meningkatkan efisiensi pertukaran gas dan transpirasi, mendukung pertumbuhan tunas ketiak yang lebih banyak (Sundari, 2018).

Filogenetik

Pohon filogenetik (Gambar. 5) dihasilkan menggunakan metode UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean*) dengan model substitusi Kimura 2-parameter. Data berupa sekuens DNA *B. caroliniana* dari kelompok kontrol (putih) dan tiga perlakuan cahaya (biru, merah, ungu), dianalisis menggunakan MEGA 11 dengan pengujian bootstrap 1000 kali untuk memastikan keakuratan tunas

ketiak pohon. *Lemna minor* digunakan sebagai *outgroup* untuk validasi.

Perlakuan putih dan biru pada semua pohon (A, B, C) selalu berada dalam klaster yang sama dengan jarak genetik 0,0000 hingga 0,0063. Ini menunjukkan cahaya biru tidak memberikan perubahan genetik signifikan dengan putih. Perlakuan Merah dan Ungu membentuk klaster terpisah dari putih dan biru. Namun, jarak genetik antar kelompok sangat kecil (0,0000–0,0010), mengindikasikan adaptasi genetik awal yang sangat minimal terhadap perlakuan cahaya merah dan ungu. Jarak genetik antara *Lemna minor* (Outgroup) dan *B. caroliniana* tetap konsisten (0,1071–0,1190), menegaskan validitas analisis dan membedakan evolusi antar spesies.

Pohon A memperlihatkan bahwa semua perlakuan menunjukkan jarak genetik 0,0000, mengindikasikan tidak ada perubahan genetik yang terdeteksi. Pohon B terdapat sedikit variasi genetik, terbentuk dua kelompok yaitu kelompok putih - biru (jarak genetik 0,0063), dan ungu - merah (0,0054) menunjukkan potensi efek cahaya yang sangat kecil. Pohon C kembali memperlihatkan tidak ada variasi genetik signifikan (semua jarak genetik 0,0000), konsisten dengan hasil pohon A.

Perbedaan yang terjadi pada pohon B dapat diinterpretasikan sebagai pengaruh sementara terhadap gen yang sedang diuji, akibat perlakuan lingkungan, paparan cahaya. Perlakuan ini dapat memicu respons genetik sementara yang tidak selalu menghasilkan perubahan permanen pada urutan DNA itu sendiri. Fenomena ini dikaitkan dengan mekanisme epigenetik, yang memungkinkan organisme untuk beradaptasi terhadap perubahan lingkungan tanpa mengubah kode genetik mereka. Contohnya adalah dan modifikasi histon,

yang dapat menyalakan atau mematikan gen. Penelitian menunjukkan bahwa lingkungan, seperti stres, dapat memicu perubahan ini. Secco *et al.* (2015) menemukan bahwa stres dapat mengubah DNA secara sementara, memungkinkan respons cepat yang bisa kembali normal setelah stres hilang. De Kort *et al.* (2019) menunjukkan bahwa lingkungan yang beragam dapat memengaruhi pola modifikasi epigenetik, membuat organisme lebih fleksibel dalam menghadapi perubahan.

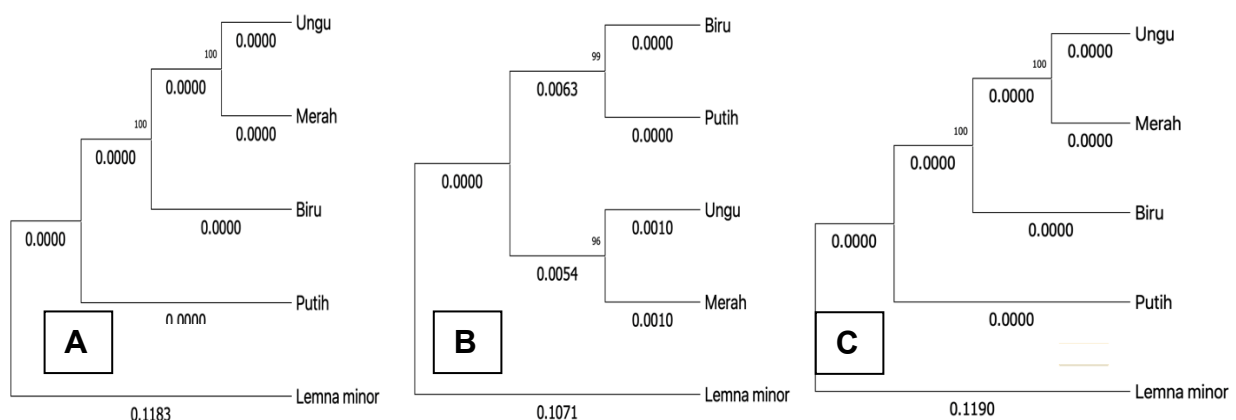
Perubahan epigenetik dapat diwariskan ke generasi berikutnya, meskipun sifatnya sementara. Misalnya, penelitian Carone *et al.* (2010) dan Kou *et al.* (2011) menunjukkan bahwa lingkungan tertentu, seperti kekeringan atau kurangnya nutrisi, dapat memengaruhi pola epigenetik tanaman, sehingga keturunan tanaman menjadi lebih tahan terhadap kondisi sulit Zheng *et al.* (2013).

Penelitian juga menunjukkan bahwa gen dan lingkungan bekerja sama dalam memengaruhi epigenetik. Misalnya, pada kembar identik, lingkungan dapat membuat pola epigenetik mereka berbeda seiring waktu (Jylhävä *et al.*, 2019; Reynolds *et al.*, 2020). Bahkan, (Miao *et al.* 2024) menemukan bahwa faktor lingkungan unik sangat memengaruhi perubahan pola epigenetik dalam jangka panjang. Plastisitas fenotipik adalah kemampuan organisme untuk mengubah karakter mereka sesuai lingkungan. Fishman (2023) menjelaskan bahwa modifikasi epigenetik berfungsi

seperti saklar, memungkinkan adaptasi cepat terhadap musim atau perubahan lingkungan.

Modifikasi epigenetik sangat berguna dalam ilmu pertanian. Dar *et al.* (2022) melaporkan bahwa tanaman yang mengalami perubahan epigenetik lebih tahan terhadap stres seperti kekeringan, sehingga lebih produktif. Hal ini sangat penting di tengah perubahan iklim. Keunggulan lain dari modifikasi epigenetik adalah sifatnya yang bisa berubah-ubah. Perubahan ini bisa terjadi cepat karena stres, tapi kembali normal saat stres hilang (Kou *et al.*, 2011; Dar *et al.*, 2022). Dengan cara ini, organisme dapat bertahan hidup di lingkungan yang berubah tanpa harus mengubah DNA mereka secara permanen. Temuan ini penting untuk memahami cara adaptasi dan penerapannya di pertanian serta konservasi.

Penemuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa perubahan epigenetik, meskipun tidak mengubah urutan DNA, dapat membantu organisme beradaptasi dengan perubahan lingkungan dalam jangka pendek. Fenomena ini menggambarkan bagaimana modifikasi epigenetik memungkinkan respons cepat terhadap stres lingkungan tanpa mengubah informasi genetik secara permanen. Oleh karena itu, meskipun perubahan epigenetik dapat diwariskan dan mempengaruhi adaptasi jangka panjang, perubahan ini bersifat sementara dan dapat kembali normal setelah kondisi stres hilang



Gambar 5. Pohon filogenetik *B. caroliniana* setelah perlakuan cahaya 6 (A), 8 (B) dan 10 bulan (C)

KESIMPULAN

Perlakuan cahaya putih pada *B. caroliniana* memberikan hasil tertinggi dalam meningkatkan jumlah daun, tunas ketiak, tinggi tanaman, dan akar, tanpa memicu perubahan genetik signifikan. Cahaya putih memberikan hasil terbaik pada semua parameter morfologi, dengan jumlah daun tertinggi (30.800), sementara cahaya ungu menghasilkan jumlah daun terendah (17.500). Cahaya putih meningkatkan kapasitas fotosintesis dan akumulasi biomassa, menjadikannya strategi efektif untuk kultur jaringan atau akuakultur dalam lingkungan terkendali. Analisis filogenetik menunjukkan bahwa cahaya biru, merah, dan ungu hanya menghasilkan variasi genetik minimal dibandingkan dengan kontrol (cahaya putih).

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Borneo Aquatic atas tanaman introduksi *Bacopa* dan DIPA Program Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan-ORHL- BRIN-2023 No. RP2-3-30-2023 yang mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anindito, B., Sooi, A.G., Achlaq, M.M., Al-Azam, M.N., Winaya, A. and Maftuchah, M. 2018. Indoor Agriculture: Measurement of The Intensity of LED for Optimum Photosynthetic Recovery. In: *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*. IEEE. 356–361. doi: 10.1109/EECSI.2018.8752827.
- Arifah, R.U., Sedjati, S., Supriyanti, E. dan Ridlo, A. 2019. Kandungan Klorofil dan Fukosantin serta Pertumbuhan *Skeletonema costatum* pada Pemberian Spektrum Cahaya Yang Berbeda. *Buletin Oseanografi Marina* 8(1):25. doi: 10.14710/buloma.v8i1.19986.
- Bornette, G. and Puijalon, S. 2011. Response of aquatic plants to abiotic factors: a review. *Aquatic Sciences* 73(1): 1–14. doi: 10.1007/s00027-010-0162-7.
- Carone, B., Fauquier, L., Habib, N., Shea, J., Hart, C., Li, R., Bock, C., Li, C., Gu, H., Zamore, P., Meissner, A., Weng, Z., Hofmann, H., Friedman, N., Rando, O. 2010. Paternally Induced Transgenerational Environmental Reprogramming of Metabolic Gene Expression in Mammals. *Cell* 143(7): 1084–1096. doi: 10.1016/j.cell.2010.12.008.
- Cartika, I., Rahayu, S.T., Basuki, R.S. dan Soetiarso, T.A. 2022. Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Bawang Putih pada Berbagai Penambahan Lama Penyinaran Lampu LED Putih. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)* 50(1): 57–64. doi: 10.24831/jai.v50i1.39300.
- Cope, K.R. and Bugbee, B. 2013. Spectral Effects of Three Types of White Light-emitting Diodes on Plant Growth and Development: Absolute versus Relative Amounts of Blue Light. *HortScience* 48(4): 504–509. doi: 10.21273/HORTSCI.48.4.504.
- Dar, F.A., Mushtaq, N.U., Saleem, S., Rehman, R.U., Dar, T.U.H. and Hakeem, K.R. 2022. Role of Epigenetics in Modulating Phenotypic Plasticity against Abiotic Stresses in Plants. *International Journal of Genomics* 2022. 1–13. doi: 10.1155/2022/1092894.
- Fankhauser, C. and Casal, J.J. 2004. Phenotypic characterization of a photomorphogenic mutant. *The Plant Journal* 39(5): 747–760. doi: 10.1111/j.1365-3113X.2004.02148.x.
- Fiorucci, A.-S. and Fankhauser, C. 2017. Plant Strategies for Enhancing Access to Sunlight. *Current Biology* 27(17): R931–R940. doi: 10.1016/j.cub.2017.05.085.

- García-Caparrós, P., Martínez-Ramírez, G., Almansa, E.M., Javier Barbero, F., Chica, R.M. and Teresa Lao, M. 2020. Growth, Photosynthesis, and Physiological Responses of Ornamental Plants to Complementation with Monochromic or Mixed Red-Blue LEDs for Use in Indoor Environments. *Agronomy* 10(2): 284. doi: 10.3390/agronomy10020284.
- Gettys, L. and Torre, C.J.D. 2015. Lemon bacopa: *Bacopa caroliniana*. *journals.flvc.org*. 1–3. Available at: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AG392> [Accessed: 2 January 2024].
- Herwitarahman, A., Poerwanto, R., Sopandie, D. dan Matra, D.D. 2021. Respon Fisiologi pada Pembibitan Mangga Kasturi (*Mangifera casturi* Kosterm) terhadap Aplikasi Cahaya LED (Light Emitting Diode). *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)* 49(3): 302–307. doi: 10.24831/jai.v49i3.38250.
- Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W. and Harbinson, J. 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany* 61(11): 3107–3117. doi: 10.1093/jxb/erq132.
- Hou, J., Wang, S., Shan, G., Yuan, L., Wang, C., Zhu, S., Wang, X., Qiu, L. 2022. Identification of Low-Light-Resistant Germplasm and Related Loci of Soybean. *Agronomy* 12(7): 1483. doi: 10.3390/agronomy12071483.
- Izzah, N., Nugraha, M.F.I. dan Lestari, R. 2022. Histo-anatomy and morphology of aquatic plants *Bacopa amplexicaulis* (Pursh) Wettst., *Bacopa lanigera* (Cham. & Schltdl.) Wettst., and *Bacopa rotundifolia* (Michx.) Wettst. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1119(1): 012002. doi: 10.1088/1755-1315/1119/1/012002.
- Jiang, W., Liu, T., Nan, W., Jeewani, D., Niu, Y., Li, C., Wang, Y., Shi, X., Wang, C., Wang, J., Li, Y., Gao, X., Wang, Z. 2018. Two transcription factors TaPpm1 and TaPpb1 co-regulate anthocyanin biosynthesis in purple pericarps of wheat. *Journal of Experimental Botany* 69(10): 2555–2567. doi: 10.1093/jxb/ery101.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S. and Yoshihara, T. 2010. Blue Light-emitting Diode Light Irradiation of Seedlings Improves Seedling Quality and Growth after Transplanting in Red Leaf Lettuce. *HortScience* 45(12): 1809–1814. doi: 10.21273/HORTSCI.45.12.1809.
- Jylhävä, J., Hjelmberg, J., Soerensen, M., Munoz, E., Tan, Q., Kuja-Halkola, R., Mengel-From, J., Christensen, K., Christiansen, L., Hägg, S., Pedersen, N., Reynolds, C. 2019. Longitudinal changes in the genetic and environmental influences on the epigenetic clocks across old age: Evidence from two twin cohorts. *EBioMedicine* 40: 710–716. doi: 10.1016/j.ebiom.2019.01.040.
- Kopsell, D.A., Sams, C.E. and Morrow, R.C. 2015. Blue Wavelengths from LED Lighting Increase Nutritionally Important Metabolites in Specialty Crops. *HortScience* 50(9): 1285–1288. doi: 10.21273/HORTSCI.50.9.1285.
- Kort, D.H., Panis, B., Deforce, D., Van Nieuwerburgh, F. and Honnay, O. 2019. Ecological divergence of DNA methylation patterns at distinct spatial scales. doi: 10.1101/832816.
- Kou, H., Li, Y., Song, X., Ou, X., Xing, S., Ma, J., Von, W.D., Liu, B. 2011. Heritable alteration in DNA methylation induced by nitrogen-deficiency stress accompanies enhanced tolerance by progenies to the stress in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Physiology* 168(14): 1685–1693. doi: 10.1016/j.jplph.2011.03.017.

- Lai, C., Pan, H., Zhang, J., Wang, Q., Que, Q., Pan, R., Lai, Z., Lai G. 2022. Light Quality Modulates Growth, Triggers Differential Accumulation of Phenolic Compounds, and Changes the Total Antioxidant Capacity in the Red Callus of *Vitis davidii*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 70(41): 13264–13278. doi: 10.1021/acs.jafc.2c04620.
- Lee, J.H. and Nam, S.Y. 2023. Vegetative Propagation of Six Pachyphytum Species as Influenced by Different LED Light Qualities. *Horticultural Science and Technology* 41(3): 237–249. doi: 10.7235/HORT.20230022.
- Li, D., Linghu, S., Zhang, Y., Song, S., Cao, J., H, Zhang Y., Yu, F., Han, Y. 2024. Genetic Map Construction and Primary Quantitative Trait Locus Analysis of Low-Light-Stress-Related Traits in Cucumber. *Agronomy* 14(5): 1061. doi: 10.3390/agronomy14051061.
- Liu, S., Wang, X. and Peng, L. 2023. Comparative Transcriptomic Analysis of the Metabolism of Betalains and Flavonoids in Red Amaranth Hypocotyl under Blue Light and Dark Conditions. *Molecules* 28(15): 5627. doi: 10.3390/molecules28155627.
- Liu, T.T., Chao, L.K.P., Hong, K.S., Huang, Y.J. and Yang, T.-S. 2019. Composition and Insecticidal Activity of Essential Oil of *Bacopa caroliniana* and Interactive Effects of Individual Compounds on the Activity. *Insects* 11(1): 23. doi: 10.3390/insects11010023.
- Miao, K., Liu, S., Cao, W., Lv, J., Yu, C., Huang, T., Sun, D., Liao, C., Pang, Y., Hu, R., Pang, Z., Yu, M., Wang, H., Wu, X., Liu, Y., Gao, W., Li, L. 2024. Five years of change in adult twins: longitudinal changes of genetic and environmental influence on epigenetic clocks. *BMC Medicine* 22(1): 289. doi: 10.1186/s12916-024-03511-y.
- Okazawa, T. and Nishijima, T. 2017. Effect of Low Light Intensity on Longevity of Flowering on Bedding Plants Targeted for Indoor Use. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ* 51(3): 279–286. doi: 10.6090/jarq.51.279.
- Ouzounis, T., Fretté, X., Ottosen, C. and Rosenqvist, E. 2015. Spectral effects of LEDs on chlorophyll fluorescence and pigmentation in Phalaenopsis Vivien and Purple Star. *Physiologia Plantarum* 154(2): 314–327. doi: 10.1111/ppl.12300.
- Qin, H., Xu, Y., Liu, B., Gao, Y., Zheng, Y. and Li, Q. 2023. UV-A Supplement Improved Growth, Antioxidant Capacity, and Anthocyanin Accumulation in Purple Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Horticulturae* 9(6): 634. doi: 10.3390/horticulturae9060634.
- Ramadani, S., Kristina, N., Syarif, A. dan Resigia, E. 2024. Pengaruh Warna Cahaya Terhadap Morfogenesis Eksplan Kalus Bawang Putih (*Allium sativum* L.) Secara In-Vitro. *Jurnal Agroteknologi* 14(2): 63. doi: 10.24014/ja.v14i2.25211.
- Randall, W.C. and Lopez, R.G. 2015. Comparison of Bedding Plant Seedlings Grown Under \Sole Source Light Emitting Diodes (LEDs) and Greenhouse Supplemental Lighting from LEDs and High-pressure Sodium Lamps. *HortScience* 50(5): 705–713. doi: 10.21273/HORTSCI.50.5.705.
- Reynolds, C., Tan, Q., Munoz, E., Jylhävä, J., Hjelmborg, J., Christiansen, L., Hägg, S., Pedersen, N. 2020. A decade of epigenetic change in aging twins: Genetic and environmental contributions to longitudinal DNA methylation. *Aging Cell* 19(8). doi: 10.1111/accel.13197.
- Samur, G.A., Wijaya, I.M.A.S. dan Sulastri, N.N. 2023. Pengaruh Lama Penyinaran LED Merah Biru terhadap Pertumbuhan Pakcoy (*Brassica rapa* L.). *Jurnal BETA (Biosistem dan Teknik Pertanian)* 12(1): 33. doi: 10.24843/JBETA.2024.v12.i01.p04.
- Santoso, J. and Suhardjono, H. 2020. The Study of Color Spectrum Curs Value Against Sunlight Color and Artificial Light for Plant Growth. In: *Nusantara Science and Technology Proceedings*. Galaxy Science. 11–22. Available at: <https://nstproceeding.com/index.php/n>

- uscientech/article/view/279 [Accessed: 14 January 2025].
- Secco, D., Wang, C., Shou, H., Schultz, M., Chiarenza, S., Nussaume, L., Ecker, J., Whelan, J., Lister, R. 2015. Stress induced gene expression drives transient DNA methylation changes at adjacent repetitive elements. *eLife* 4. doi: 10.7554/eLife.09343.
- Sellaro, R., Crepy, M., Trupkin, S.A., Karayekov, E., Buchovsky, A.S., Rossi, C. and Casal, J.J. 2010. Cryptochrome as a Sensor of the Blue/Green Ratio of Natural Radiation in *Arabidopsis*. *Plant Physiology* 154(1): 401–409. doi: 10.1104/pp.110.160820.
- Setyati, W.A., Pramesti, R., Pringgenies, D., Suryono, C.A., Irwani, I. dan Zainuddin, M. 2020. Efek Panjang Gelombang Terhadap Pertumbuhan Propagul Pada Kultur Jaringan *Eucheuma cottonii* Doty, 1885 (Rhodophyceae; Solieracea). *Jurnal Kelautan Tropis* 23(3): 349–356. doi: 10.14710/jkt.v23i3.7075.
- Silva, D.F. da, Pio, R., Soares, J.D.R., Nogueira, P.V., Peche, P.M. and Villa, F. 2016. The production of *Physalis spp.* seedlings grown under different-colored shade nets. *Acta Scientiarum. Agronomy* 38(2): 257. doi: 10.4025/actasciagron.v38i2.27893.
- Sundari, T. 2018. Penampilan Galur-Galur Kedelai Toleran Naungan Pada Uji Daya Hasil Pendahuluan Di Dua Lingkungan. *Buletin Palawija* 14(2): 63. doi: 10.21082/bulpa.v14n2.2016.p63-71.
- Supriani, E., Budiyanto, S. and Sutarno, S. 2021. Respon Tanaman Selada Keriting Hijau Terhadap Penyinaran Lampu LED dan Konsentrasi CaCl₂ pada Sistem Hidroponik. *AGROVITAL: Jurnal Ilmu Pertanian* 6(2): 99. doi: 10.35329/agrovital.v6i2.2713.
- Tattini, M., Landi, M., Brunetti, C., Giordano, C., Remorini, D., Gould, K.S. and Guidi, L. 2014. Epidermal coumaroyl anthocyanins protect sweet basil against excess light stress: multiple consequences of light attenuation. *Physiologia Plantarum* 152(3): 585–598. doi: 10.1111/ppl.12201.
- Walter, B.L.R. 2023. *Blue Water Hyssop*. Available at: <https://www.socfindoconservation.co.id/plant/924> [Accessed: 10 November 2023].
- Yan, Z., He, D., Niu, G., Zhou, Q. and Qu, Y. 2020. Growth, nutritional quality, and energy use efficiency in two lettuce cultivars as influenced by white plus red versus red plus blue LEDs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(2): 33–40. doi: 10.25165/j.ijabe.20201302.5135.
- Yang, B., Zhou, X., Xu, R., Wang, J., Lin, Y., Pang, J., Wu, S., Zhong, F. 2016. Comprehensive Analysis of Photosynthetic Characteristics and Quality Improvement of Purple Cabbage under Different Combinations of Monochromatic Light. *Frontiers in Plant Science* 7. doi: 10.3389/fpls.2016.01788.
- Zheng, X., Chen, L., Li, M., Lou, Q., Xia, H., Wang, P., Li, T., Liu, H., Luo, L. 2013. Transgenerational Variations in DNA Methylation Induced by Drought Stress in Two Rice Varieties with Distinguished Difference to Drought Resistance. *PLoS ONE* 8(11): e80253. doi: 10.1371/journal.pone.0080253.