

Respons fotosintetik padi ketan hitam (*Oryza sativa* var. *glutinosa*) terhadap cekaman kekeringan yang diinduksi oleh PEG

Diah Sudiarti^{1*}, Nanda Dewi Agustin¹, Imam Bukhori Muslim¹

¹Prodi Pendidikan Biologi Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Islam Jember

*Corresponding author: Jl. Kyai Mojo No. 101 Jember, Jawa Timur, Indonesia. 68133

E-mail addresses: diah.sudiarti23@gmail.com

Kata kunci

Asam absisat
Cekaman kekeringan
Klorofil
Stomata
Strigolaktone

Keywords

Abscisic acid
Drought stress
Chlorophyll
Stomata
Strigolactone

Diajukan: 22 Mei 2025
Ditinjau: 24 Mei 2025
Diterima: 19 Juni 2025
Diterbitkan: 24 Juli 2025

Cara Sitasi:

D. Sudiarti, N. D. Agustin, I. B. Muslim, "Respons fotosintetik padi ketan hitam (*Oryza sativa* var. *glutinosa*) terhadap cekaman kekeringan yang diinduksi oleh PEG", *Filogeni: Jurnal Mahasiswa Biologi*, vol. 5, no. 2, pp. 135-142, 2025.

Abstrak

Cekaman kekeringan merupakan salah satu faktor abiotik utama yang mengganggu efisiensi fotosintesis tanaman. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi respons fotosintetik padi ketan hitam (*Oryza sativa* var. *glutinosa*) terhadap cekaman kekeringan yang diinduksi oleh PEG 6000 secara in vitro, serta menilai efektivitas hormon asam absisat (ABA), strigolaktone (SL), dan kombinasinya dalam fase *recovery*. Parameter yang diamati meliputi kadar klorofil a dan b, rasio klorofil a/b, total klorofil, kandungan karoten, serta kerapatan dan pembukaan stomata. Perlakuan terdiri dari kontrol (MS0), PEG 6000 (8%), dan *recovery* dengan hormon ABA, SL, serta kombinasi ABA+SL. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan PEG menurunkan kadar total klorofil (-37,1%) dan karoten (-46,6%) secara signifikan dibandingkan kontrol, serta menurunkan persentase stomata terbuka hingga 5,55%. Pemulihan dengan kombinasi ABA dan SL mampu meningkatkan kembali pembukaan stomata hingga 20%, serta menstabilkan rasio klorofil a/b dan kandungan karoten. Kombinasi hormon menunjukkan efek sinergis dalam mengoptimalkan adaptasi morfofisiologis tanaman terhadap cekaman osmotik. Temuan ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi mitigasi kekeringan berbasis hormon dan potensi peningkatan ketahanan fisiologis padi lokal.

Abstract

Drought stress is one of the main abiotic factors that interfere with the photosynthetic efficiency of plants. This study aims to evaluate the photosynthetic response of black glutinous rice (*Oryza sativa* var. *glutinosa*) to drought stress induced by PEG 6000 in vitro, and assess the effectiveness of abscisic acid (ABA), strigolactone (SL), and their combination in the recovery phase. Parameters observed included chlorophyll a and b content, chlorophyll a/b ratio, total chlorophyll, carotene content, and stomatal density and opening. The treatments included control (MS0), PEG 6000 (8%), and recovery with ABA, SL, and ABA+SL combination hormones. The results showed that PEG treatment significantly reduced total chlorophyll (-37.1%) and carotene (-46.6%) levels compared to the control, reducing the open stomata percentage to 5.55%. Recovery with a combination of ABA and SL was able to increase stomatal opening back up to 20%, and stabilize the chlorophyll a/b ratio and carotene content. The combination of hormones showed a synergistic effect in optimizing the morphophysiological adaptation of plants to osmotic stress. These findings contribute to the development of hormone-based drought mitigation strategies and the potential for improving the physiological resilience of local rice.

1. Pendahuluan

Kekeringan merupakan salah satu bentuk cekaman abiotik utama yang secara signifikan menghambat produktivitas pertanian global, termasuk pada komoditas penting seperti padi. Padi ketan hitam (*Oryza sativa* var. *glutinosa*) merupakan varietas lokal yang kaya akan nutrisi dan senyawa bioaktif, serta memiliki nilai ekonomis tinggi. Akan tetapi, sensitivitas varietas ini terhadap kekurangan air menjadikannya rentan terhadap penurunan hasil panen pada kondisi lahan kering [1]. Dalam kondisi kekurangan air, tanaman mengalami penurunan fungsi fisiologis, terutama pada proses fotosintesis. Salah satu respons adaptif tanaman terhadap cekaman kekeringan adalah melalui perubahan struktur dan fungsi stomata serta penurunan kadar pigmen fotosintetik seperti klorofil dan karoten. Secara fisiologis, cekaman kekeringan mengganggu proses fotosintesis melalui beberapa mekanisme, termasuk degradasi pigmen fotosintetik (klorofil dan karotenoid), penurunan efisiensi fotokimia, serta gangguan pada struktur dan fungsi stomata [2].

Stomata memainkan peran penting dalam pengaturan pertukaran gas dan kehilangan air melalui transpirasi. Ketika tanaman mengalami stres air, densitas stomata dan proporsi stomata terbuka dapat mengalami perubahan yang dramatis. Selain itu, kadar klorofil a dan b sebagai indikator fotosintesis sering kali menurun akibat degradasi pigmen atau gangguan biosintesis selama periode stres [3]. Klorofil a dan b merupakan pigmen utama dalam menangkap energi cahaya, sementara karotenoid berperan sebagai antioksidan alami yang melindungi sistem fotosintesis dari stres oksidatif. Ketidakseimbangan komponen ini akibat kekeringan dapat memicu penurunan performa fotosintetik dan pertumbuhan tanaman.

Salah satu strategi untuk mempelajari dan mensimulasikan kekeringan secara terkontrol di laboratorium adalah dengan menggunakan *polyethylene glycol* (PEG) 6000. Penggunaan PEG 6000 secara *in vitro* telah banyak digunakan sebagai agen osmotik untuk mensimulasikan kondisi kekeringan karena kemampuannya menurunkan potensial air tanpa memasuki jaringan tanaman [4]. Senyawa ini bersifat osmotik tanpa menembus membran sel, sehingga mampu menurunkan potensial air media dan menciptakan kondisi stres air buatan [3]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa PEG dapat menyebabkan penurunan klorofil dan perubahan densitas stomata pada berbagai spesies tanaman, termasuk padi [4].

Selain pemahaman mengenai dampak stres, aspek pemulihan tanaman pasca-cekaman juga penting dikaji. Hormon tumbuhan seperti asam absisat (ABA) dan strigolaktone (SL) diketahui berperan penting dalam respons adaptif tanaman terhadap stres. ABA berperan dalam penutupan stomata dan aktivasi respons molekuler terhadap dehidrasi, sedangkan SL memiliki fungsi dalam pengaturan pertumbuhan akar dan interaksi sinyal hormonal yang lebih kompleks [5][6]. Penelitian terbaru mengindikasikan bahwa kombinasi ABA dan SL dapat menghasilkan efek sinergis dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan, namun kajian terkait mekanisme pemulihan fisiologis, khususnya pada varietas lokal seperti padi ketan hitam, masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji respons fotosintetik padi ketan hitam terhadap cekaman kekeringan buatan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro*, dengan fokus pada perubahan kadar klorofil, karoten, dan karakteristik stomata. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi efektivitas hormon ABA, SL, serta kombinasi keduanya dalam memulihkan fungsi fisiologis tanaman pasca-stres. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan strategi pemuliaan dan teknologi adaptasi tanaman berbasis respons fisiologis terhadap cekaman lingkungan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium yang dilakukan secara *in vitro* dengan pendekatan kuantitatif. Ruang lingkup penelitian ini mencakup respons fisiologis fotosintetik tanaman padi ketan hitam (*Oryza sativa var glutinosa*) terhadap cekaman kekeringan yang diinduksi oleh PEG 6000. Fokus utama pengamatan adalah perubahan kadar pigmen fotosintetik (klorofil a, klorofil b, total klorofil, dan karoten) serta karakteristik stomata (kerapatan dan persentase stomata terbuka). Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh sampel daun tanaman padi ketan hitam umur 21 hari setelah tanam (HST) yang ditanam secara *in vitro*. Sampel diambil secara *purposive* berdasarkan kematangan daun dan keseragaman morfologi. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan lima perlakuan dan tiga ulangan. Perlakuan meliputi: (1) Kontrol (MS0), (2) PEG 8%, (3) *Recovery* dengan ABA 0,075 mM, (4) *Recovery* dengan SL 0,01 ppm, dan (5) *recovery* kombinasi ABA + SL.

Instrumentasi. Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain gelas ukur, pipet tetes, mikroskop cahaya dengan kamera digital, gelas objek, penutup objek, kamera handphone, penggaris digital (*Image Raster 3.0*), oven, spektrofotometer, dan tabung sentrifugasi. Bahan-bahan yang digunakan meliputi daun padi ketan hitam 21 HST, larutan PEG 6000 konsentrasi 8%, larutan hormon ABA 0,075 mM, larutan hormon SL 0,01 ppm, aquadest, etanol 96%, aseton 80%, dan kuteks bening untuk cetakan stomata.

Inisiasi benih. Penelitian ini diawali dengan menumbuhkan tanaman padi ketan hitam secara *in vitro*. Benih padi ketan hitam ditanam pada media MS (Murashige dan Skoog).

Pengaplikasian cekaman & hormon. Setelah tanaman berusia 7 hst (hari setelah tanam), tanaman dipindah pada media MS yang dikombinasikan dengan larutan PEG 6000 8% sebagai perlakuan stres kekeringan. Pada media PEG tanaman ditanam selama tujuh hari pada suhu ruang untuk mensimulasikan cekaman kekeringan buatan [7]. Setelah itu tanaman dipindah pada medium *recovery* (MS0) yang dikombinasikan dengan hormon ABA, SL, dan ABA+SL. Tanaman dibiarkan selama tujuh hari pada media *recovery*, setelah itu tanaman dipanen untuk dilakukan pengumpulan data. Sehingga secara keseluruhan tanaman berusia 21 hst saat dilakukan panen untuk dilakukan pengambilan data.

Pengamatan stomata. Pengamatan dilakukan dengan metode cetakan menggunakan kuteks bening. Permukaan bawah daun dioles kuteks, kemudian setelah kering ditempel dengan isolasi bening dan dipindahkan ke gelas objek. Sampel diamati di bawah mikroskop cahaya dengan pembesaran 400 \times , dan gambar diamati menggunakan *Image Raster* untuk menghitung jumlah stomata total dan terbuka per luas bidang pengamatan 0,078 mm² [8].

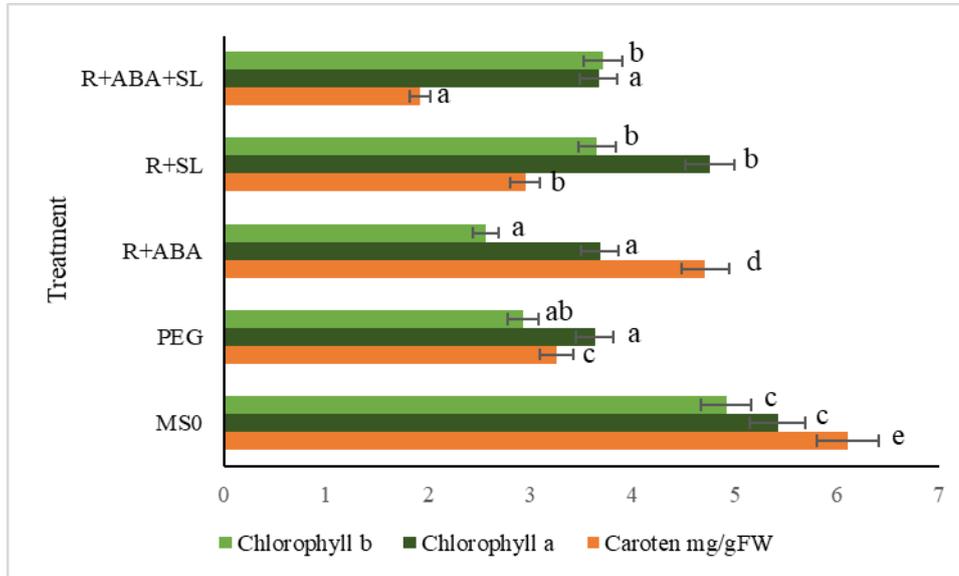
Pengukuran kandungan klorofil dan karoten. Daun ditimbang sebanyak 0,1 gram, ditumbuk halus dalam mortar bersama aseton 80%, kemudian disentrifugasi selama 15 menit pada kecepatan 3000 rpm. Supernatan dibaca absorbansinya pada panjang gelombang 645 nm, 663 nm (untuk klorofil a dan b), dan 470 nm (untuk karoten) menggunakan spektrofotometer. Perhitungan konsentrasi pigmen mengacu pada formula yang telah divalidasi dalam literatur fisiologi tumbuhan [3].

Analisis data. Data hasil pengamatan dianalisis statistik menggunakan SPSS versi 16. Analisis statistik ANOVA *multivariate* digunakan untuk mengetahui pengaruh treatment terhadap kadar klorofil a, b, dan karoten. Jika ada pengaruh maka dilanjutkan dengan Uji Duncan untuk mengetahui beda nyata. Semua prosedur laboratorium dijalankan sesuai protokol keselamatan kerja dan berdasarkan metode yang telah dikembangkan dalam studi sebelumnya [1][3].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Penelitian

Untuk memahami pengaruh berbagai perlakuan cekaman kekeringan terhadap kandungan pigmen fotosintetik pada tanaman, dilakukan pengukuran kadar klorofil a, klorofil b, dan karoten pada fase *recovery* setelah cekaman kekeringan. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kandungan klorofil a, klorofil b, dan karoten (mg/g berat segar) pada berbagai perlakuan, meliputi MS0 (kontrol tanpa cekaman), PEG (cekaman kekeringan), R+ABA (pemulihan dengan ABA), R+SL (pemulihan dengan SL), dan R+ABA+SL (pemulihan dengan kombinasi ABA dan SL)

Hasil analisis kandungan pigmen fotosintesis menunjukkan respon yang bervariasi antar perlakuan (Gambar 1). Perlakuan kombinasi hormon R+ABA+SL menghasilkan peningkatan kandungan klorofil a dan b yang signifikan dibandingkan dengan perlakuan lainnya, yang mengindikasikan adanya sinergi hormon dalam menginduksi pemulihan sistem fotosintesis pasca cekaman kekeringan. Kandungan klorofil a tertinggi tercatat pada perlakuan R+ABA+SL, berbeda nyata dengan perlakuan PEG dan kontrol (MS0), mengindikasikan bahwa aplikasi kombinasi ABA dan SL efektif merevitalisasi fungsi kloroplas yang terganggu akibat cekaman. Sebaliknya, kandungan karoten tertinggi ditemukan pada tanaman kontrol (MS0), yang menurun secara drastis pada tanaman yang tercekam dan hanya pulih sebagian setelah perlakuan hormon. Penurunan karoten selama fase pemulihan, terutama pada perlakuan R+ABA+SL, dapat mengindikasikan berkurangnya kebutuhan tanaman akan antioksidan non-enzimatik karena adanya perbaikan kondisi fisiologis secara umum. Hasil analisis kandungan pigmen fotosintesis bervariasi tergantung pada perlakuan (Gambar 1).

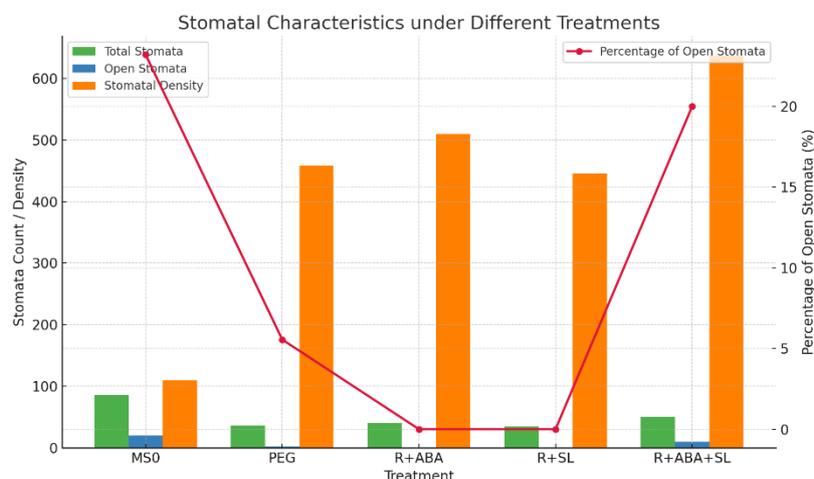
Pengukuran kadar klorofil a dan b pada daun padi ketan hitam menunjukkan penurunan signifikan pada tanaman yang diberi perlakuan PEG 6000 (8%) dibanding kontrol. Klorofil a menurun dari $5,42 \pm 0,05$ mg/g menjadi $3,63 \pm 0,02$ mg/g, sedangkan klorofil b turun dari $4,92 \pm 0,07$ mg/g menjadi $2,93 \pm 0,75$ mg/g (Tabel 1).

Tabel 1. Pengaruh perlakuan hormonal terhadap pemulihan kandungan pigmen fotosintesis pada *Oryza sativa* var. *glutinosa* pasca cekaman kekeringan yang diinduksi oleh PEG 6000

Perlakuan	Total Stomata	Kerapatan (stomata/mm ²)	Persentase Terbuka (%)	Klorofil a (mg/g)	Klorofil b (mg/g)	Total Klorofil (mg/g)	Karoten (mg/g)	Rasio a/b
MS0	86	109,50	23,20	5,42 ± 0,05 ^c	4,92 ± 0,07 ^c	9,51 ± 0,09	6,11 ± 0,03 ^c	1,10 ± 0,02
PEG 8%	36	458,59	5,55	3,63 ± 0,02 ^a	2,93 ± 0,75 ^{ab}	5,98 ± 0,80	3,26 ± 0,02 ^c	1,29 ± 0,29
R + ABA	40	509,55	0,00	3,68 ± 0,04 ^a	2,56 ± 0,12 ^a	5,62 ± 0,10	4,71 ± 0,02 ^d	1,44 ± 0,09
R + SL	35	445,85	0,00	4,76 ± 0,08 ^b	3,65 ± 0,17 ^b	7,64 ± 0,19	2,95 ± 0,02 ^b	1,31 ± 0,07
R + ABA+SL	50	636,94	20,00	3,67 ± 0,05 ^a	3,71 ± 0,08 ^b	6,84 ± 0,07	1,92 ± 0,03 ^a	0,99 ± 0,04

Keterangan: MS0 (kontrol tanpa cekaman kekeringan), PEG (cekaman kekeringan), R+ABA (pemulihan dengan asam absisat), R+SL (pemulihan dengan strigolakton), dan R+ABA+SL (pemulihan dengan kombinasi ABA dan SL). Data mewakili nilai rata-rata kandungan klorofil dan karotenoid total (mg/g berat segar). Bilah galat menunjukkan standar deviasi. Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan berdasarkan uji DMRT pada $p < 0,05$

Cekaman kekeringan selain berpengaruh terhadap kadar klorofil, dan karoten, juga berpengaruh terhadap konduktansi stomata. Analisis stomata menunjukkan respon yang berbeda di antara perlakuan terkait jumlah stomata, kerapatan stomata, dan keterbukaan stomata (Gambar 2). Kelompok kontrol (MS0) menunjukkan jumlah stomata dan persentase stomata terbuka tertinggi (23,2%), yang mengindikasikan fungsi stomata yang optimal dalam kondisi tanpa cekaman. Di bawah cekaman kekeringan (PEG), meskipun total stomata berkurang, sebagian kecil (5,55%) tetap terbuka, mungkin sebagai mekanisme adaptif untuk menyeimbangkan pertukaran gas dan kehilangan air.



Gambar 2. Karakteristik stomata meliputi total stomata, jumlah stomata terbuka, kerapatan stomata (batang), dan persentase stomata terbuka (garis) pada berbagai perlakuan (Kontrol: MS0), Cekaman kekeringan: PEG), Pemulihan dengan ABA: (R+ABA), SL (R+SL), dan Kombinasi ABA dan SL: (R+ABA+SL). Nilai-nilai tersebut mewakili jumlah rata-rata dari area pengamatan mikroskopis seluas 0,078 mm²

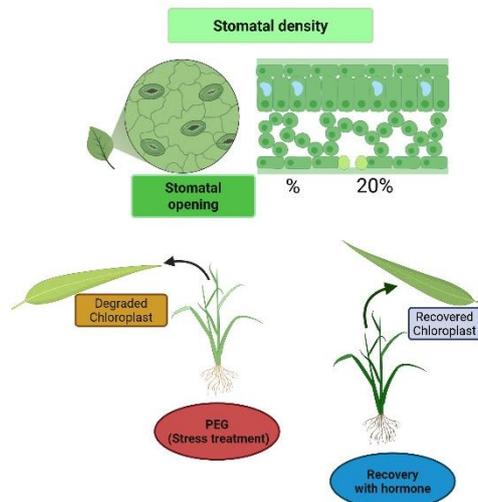
Konduktansi Stomata (kerapatan stomata) meningkat tajam pada perlakuan PEG (458,59 stomata/mm²) dibanding kontrol (109,50 stomata/mm²), dan mencapai nilai tertinggi pada kombinasi hormon ABA+SL (636,94 stomata/mm²). Persentase stomata terbuka sangat rendah pada PEG dan hormon tunggal (0–5,55%), namun pada kombinasi hormon pembukaan stomata meningkat hingga 20% (Tabel 1). Hal ini menunjukkan respons morfologi dan fisiologis untuk menjaga keseimbangan air dan fotosintesis, sebagaimana dijelaskan oleh Jain dkk [4]. Sebaliknya, pemulihan dengan ABA atau SL saja (R+ABA, R+SL) tidak menghasilkan stomata yang terbuka, meskipun kerapatan stomata tinggi. Hal ini mungkin tercermin dalam strategi pengolahan air yang lebih konservatif yang memprioritaskan konservasi air daripada pertukaran gas. Temuan ini mendukung hipotesis

bahwa kombinasi pengobatan hormonal dapat mengoptimalkan perilaku stomata dengan menyeimbangkan pemulihan dari stres dengan pertukaran gas yang terkontrol.

3.2 Pembahasan

Cekaman kekeringan yang diinduksi oleh PEG-6000 secara signifikan menurunkan kandungan klorofil total dan karotenoid pada padi ketan hitam. Hal ini mengindikasikan gangguan pada sistem fotosintetik, terutama kerusakan struktur tilakoid dan degradasi pigmen yang diinduksi oleh akumulasi spesies oksigen reaktif (ROS). Penurunan ini sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa stres air menghambat sintesis klorofil melalui peningkatan aktivitas enzim klorofilase dan peroksidasi lipid membran kloroplas [9]. Penurunan kadar pigmen ini mengindikasikan gangguan pada fotosistem dan sintesis klorofil akibat stres osmotik yang diinduksi PEG, sesuai dengan laporan Lichtenthaler & Buschmann yang menyatakan bahwa kekeringan menyebabkan degradasi pigmen fotosintetik dan penurunan efisiensi fotosintesis [10].

Perlakuan dengan kombinasi hormon R+ABA+SL menunjukkan hasil yang menonjol. Temuan ini memberikan kepercayaan terhadap peran strategis yang dimainkan oleh sinergi SL dan ABA dalam memaksimalkan pemulihan sistem fotosintesis dengan meningkatkan kandungan klorofil dan mengendalikan metabolisme pigmen sekunder. Peningkatan kadar klorofil mengindikasikan bahwa hormon SL dan ABA dapat memperbaiki kondisi fisiologis tanaman dengan memperbaiki kloroplas yang berperan dalam biosintesis klorofil [13]. Hal ini dapat divisualisasikan dengan ilustrasi pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh hormon terhadap pigmen fotosintetik pada kondisi cekaman kekeringan dan tahap *recovery* (pemulihan)

Pada Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa cekaman kekeringan menyebabkan klorofil pada daun terdegradasi, menyebabkan daun berwarna kekuningan. Sedangkan pada tanaman yang mengalami proses *recovery* dengan pengaplikasian hormon menunjukkan perbaikan klorofil, sehingga daun masih tetap berwarna hijau. Begitupun dengan kepadatan stomata, dimana nilai terbaik terdapat pada tanaman dengan perlakuan *recovery* yang dikombinasikan dengan ABA dan SL (20%). Hal ini menunjukkan bahwa kebanyakan stomata pada daun dengan perlakuan tersebut masih tertutup, sehingga hal ini menghalangi terjadinya proses penguapan dan pertukaran gas lainnya.

Aplikasi kombinasi SL dan ABA selama fase pemulihan menunjukkan peningkatan signifikan pada kandungan klorofil dan karotenoid dibandingkan kontrol. Strigolaktone berperan dalam menjaga integritas membran dan memperkuat respons antioksidan, sementara ABA memfasilitasi penutupan stomata dan perlindungan sel dari stres dehidrasi. Interaksi sinergis antara SL dan ABA dalam memodulasi jalur pensinyalan terkait ROS dan ekspresi gen fotosintetik mendukung pemulihan fungsi fotosintetik pasca cekaman kekeringan [14][15]. Hal ini menegaskan bahwa aplikasi hormonal, terutama kombinasi SL dan ABA, dapat mempercepat pemulihan fungsi fotosintetik pasca stres kekeringan, yang krusial dalam adaptasi tanaman terhadap perubahan iklim dan peningkatan ketahanan terhadap stres abiotik di lahan marginal.

Peningkatan kandungan karotenoid juga menunjukkan adanya perlindungan terhadap sistem fotosintetik melalui peran karotenoid sebagai *scavenger* ROS dan pelindung protein fotosintetik dari fotooksidasi. Penelitian oleh Zhang dkk. [16] menegaskan bahwa peningkatan karotenoid selama fase *recovery* berkorelasi positif dengan efisiensi pemulihan fotosintetik pada tanaman yang diberi hormon. Lebih lanjut, perbandingan antar perlakuan menunjukkan bahwa kombinasi SL+ABA memberikan respons fotosintetik yang paling optimal, melampaui aplikasi tunggal SL maupun ABA. Ini menunjukkan bahwa interaksi sinergis kedua hormon tidak hanya menstimulasi pemulihan struktural (pigmen), tetapi juga kemungkinan memodulasi jalur pensinyalan terkait ROS dan ekspresi gen fotosintetik.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa aplikasi hormonal, terutama kombinasi SL dan ABA, dapat mempercepat pemulihan fungsi fotosintetik pasca stres kekeringan. Pemulihan ini menjadi krusial dalam konteks adaptasi tanaman terhadap perubahan iklim dan peningkatan ketahanan terhadap stres abiotik di lahan marginal.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian *in vitro* mengenai pengaruh stres kekeringan yang diinduksi oleh PEG 6000 terhadap tanaman padi ketan hitam (*Oryza sativa* var. *glutinosa*), ditemukan bahwa stres osmotik tersebut secara signifikan menurunkan kadar klorofil a, klorofil b, total klorofil, serta kandungan karoten pada daun tanaman. Penurunan ini mencerminkan gangguan pada sistem fotosintesis akibat tekanan kekeringan. Kombinasi hormon asam absisat (ABA) dan strigolaktone (SL) dapat meningkatkan kerapatan stomata pada perlakuan cekaman, serta meningkatkan presentase stomata terbuka. Selanjutnya pemberian kombinasi hormon juga menunjukkan adaptasi fisiologis yang lebih baik dalam menyeimbangkan kebutuhan fotosintesis dan konservasi tumbuhan padi ketan hitam, dibandingkan dengan pemberian PEG tunggal maupun pemberian hormon tunggal. Hasil ini menunjukkan bahwa pengembangan varietas unggul padi ketan hitam yang tahan terhadap stres air sangat potensial di masa depan. Temuan ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi mitigasi kekeringan berbasis hormon dan potensi peningkatan ketahanan fisiologis padi lokal.

Daftar Pustaka

- [1] S. A. Anjum, X. Y. Xie, L. C. Wang, M. F. Saleem, C. Man, and W. Lei, "Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress," *Int. J. Agric. Sci.*, vol. 10, no. 9, pp. 1–7, 2020, doi: 10.5897/AJAR10.027.
- [2] M. Moonmoon and S. Islam, "Physiological and biochemical responses of rice under drought stress: a review," *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 9, no. 3, pp. 31–38, 2017.
- [3] M. Farooq, A. Wahid, N. Kobayashi, D. Fujita, and S. Basra, "Plant drought stress: effects, mechanisms and management," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 29, no. 1, pp. 185–212, 2009, doi: 10.1051/agro:2008021.

- [4] M. Jain, G. Mathur, S. Koul, and N. B. Sarin, "PEG-mediated osmotic stress induces variations in antioxidant enzymes and osmolyte accumulation in rice seedlings," *Plant Growth Regulation*, vol. 69, no. 1, pp. 13–22, 2013, doi: 10.1007/s10725-012-9742-4.
- [5] E. Haryanti, "Teknik identifikasi stomata daun menggunakan cetakan kuteks dan mikroskop cahaya," *Jurnal Biologi*, vol. 12, no. 2, pp. 21–25, 2010.
- [6] L. Taiz and E. Zeiger, *Plant Physiology*, 5th ed., Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2010.
- [7] C. Travaglia, H. Reinoso, A. Cohen, and R. Bottini, "Abscisic acid effects on plant growth and drought tolerance," *Plant Science*, vol. 179, no. 3, pp. 272–278, 2010, doi: 10.1016/j.plantsci.2010.06.007.
- [8] D. Ghosh, J. Xu, A. Abi-Habib, Y. Dagdas, H. Ruschhaupt, A. R. Fernie, and P. P. Dijkwel, "Chloroplast dynamics during abiotic stress and recovery," *Plants*, vol. 11, no. 9, p. 1173, 2022, doi: 10.3390/plants11091173.
- [9] A. Gupta, A. Rico-Medina, and A. I. Caño-Delgado, "The physiology of plant responses to drought," *Science*, vol. 368, no. 6488, pp. 266–269, 2020, doi: 10.1126/science.aaz7614.
- [10] H. K. Lichtenthaler and C. Buschmann, "Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy," *Curr. Protoc. Food Anal. Chem.*, pp. F4.3.1–F4.3.8, 2001.
- [11] K. Vishwakarma, N. Upadhyay, N. Kumar, G. Yadav, J. Singh, R. K. Mishra, V. Kumar, R. Verma, R. G. Upadhyay, M. Pandey, and S. Sharma, "Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: A review on current knowledge and future prospects," *Front. Plant Sci.*, vol. 8, p. 161, 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.00161.
- [12] R. Lestari, T. Santoso, and N. Rahmawati, "Pengaruh cekaman kekeringan terhadap pertumbuhan tanaman," *J. Agroekoteknologi*, vol. 8, no. 2, pp. 73-80, 2021, doi: 10.32734/jaet.
- [13] P. Jahns and A. R. Holzwarth, "The role of the xanthophyll cycle and lutein in photoprotection of photosystem II," *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.*, vol. 1817, no. 1, pp. 182–193, 2012, doi: 10.1016/j.bbabi.2011.04.012.
- [14] Y. Osakabe, K. Osakabe, K. Shinozaki, and L. S. P. Tran, "Response of plants to water stress," *Front. Plant Sci.*, vol. 5, no. 86, pp. 1-8, 2014, doi: 10.3389/fpls.2014.00086.
- [15] P. B. Brewer, H. Koltai, and C. A. Beveridge, "Diverse roles of strigolactones in plant development," *Mol. Plant*, vol. 6, no. 1, pp. 18–28, 2013, doi: 10.1093/mp/sss130.
- [16] L. Zhang, Y. Liu, J. Zhang, J. Li, and X. He, "Plant nitrogen acquisition from inorganic and organic sources via root and mycelia pathways in ectomycorrhizal alpine forests," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 149, no. 107917, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107917.