



PERAN ASAM ABSISAT DALAM RESPONS PADI KETAN HITAM TERHADAP CEKAMAN SALINITAS IN VITRO

M. Iqbal Krisna Hadi Suryono¹⁾, Tri Agus Siswoyo²⁾

^{1,2)} Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember, Jember, Indonesia

Email: triagus.faperta@unej.ac.id

Abstract

Salinity stress is a major abiotic constraint that inhibits growth and reduces the physiological performance of rice plants. This study aimed to evaluate the morphological, physiological, and biochemical responses of black glutinous rice (*Oryza sativa* L. var. *glutinosa*) to salinity stress, with emphasis on the role of abscisic acid (ABA) under *in vitro* conditions. The experiment was arranged in a factorial Completely Randomized Design with two factors: salinity level (0 and 150 mM NaCl) and ABA treatment. The observed parameters included plant height, root length and number, relative water content, electrolyte leakage, and the contents of hydrogen peroxide and malondialdehyde. The results showed that salinity stress reduced plant growth and water status while increasing oxidative stress. Exogenous application of ABA improved several physiological parameters and reduced cellular damage under salinity stress. These findings indicate that ABA plays an important role in enhancing the tolerance of black glutinous rice to salinity stress.

Keywords: Black Glutinous Rice; Absciscic Acid; Salinity Stress; *In Vitro*.

Abstrak

Cekaman salinitas merupakan faktor abiotik yang dapat menghambat pertumbuhan dan menurunkan performa fisiologis tanaman padi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji respons morfologis, fisiologis, dan biokimia padi ketan hitam (*Oryza sativa* L. var. *glutinosa*) terhadap cekaman salinitas dengan penekanan pada peran asam absisat (ABA) secara *in vitro*. Penelitian disusun menggunakan Rancangan Acak Lengkap faktorial dengan dua faktor, yaitu tingkat salinitas (0 dan 150 mM NaCl) dan perlakuan ABA. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, panjang dan jumlah akar, kandungan air relatif, kebocoran elektrolit, serta kandungan hidrogen peroksida dan malondialdehid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cekaman salinitas menurunkan pertumbuhan dan status air tanaman serta meningkatkan stres oksidatif. Pemberian ABA mampu memperbaiki beberapa parameter fisiologis dan menekan kerusakan sel akibat salinitas. Penelitian ini menunjukkan bahwa ABA berperan penting dalam meningkatkan toleransi padi ketan hitam terhadap cekaman salinitas.

Kata Kunci: Padi Ketan Hitam; Asam Absisat; Cekaman Salinitas; *In Vitro*.



PENDAHULUAN

Cekaman salinitas merupakan salah satu faktor abiotik utama yang membatasi pertumbuhan dan produktivitas tanaman padi. Kondisi ini ditandai oleh akumulasi ion Na^+ dan Cl^- dalam jaringan tanaman yang menyebabkan ketidakseimbangan ionik, cekaman osmotik, serta peningkatan pembentukan *reactive oxygen species* (ROS). Akumulasi ROS yang berlebihan dapat memicu peroksidasi lipid, kerusakan membran sel, gangguan fotosintesis, dan akhirnya menghambat pertumbuhan tanaman (Hasanuzzaman et al., 2020). Tanaman padi (*Oryza sativa* L.) dikenal sensitif terhadap salinitas, khususnya pada fase awal pertumbuhan, sehingga respons fisiologis dan biokimia pada fase ini menjadi indikator penting tingkat toleransi tanaman (Haque et al., 2021).

Cekaman salinitas menyebabkan penurunan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara akibat tekanan osmotik serta meningkatnya rasio Na^+/K^+ pada jaringan tanaman. Kondisi tersebut berpengaruh terhadap stabilitas membran sel dan status air tanaman yang ditunjukkan oleh penurunan kandungan air relatif dan meningkatnya kebocoran elektrolit (Kumar et al., 2021). Selain itu, stres oksidatif akibat salinitas meningkatkan akumulasi senyawa ROS seperti hidrogen peroksida (H_2O_2) dan malondialdehid (MDA), yang sering digunakan sebagai indikator kerusakan seluler pada tanaman tercekam (Chunthaburee et al., 2016).

Sebagai respons terhadap cekaman salinitas, tanaman mengaktifkan mekanisme adaptif internal yang melibatkan regulasi fitohormon, terutama asam absisat (ABA). ABA berperan penting dalam pengaturan penutupan stomata, pengendalian laju transpirasi, serta pemeliharaan homeostasis ion, sehingga membantu tanaman mempertahankan status air dan mengurangi kerusakan akibat cekaman osmotik (Cutler et al., 2010). Selain itu, peningkatan kadar ABA diketahui mampu menginduksi sistem pertahanan antioksidan, seperti peningkatan aktivitas enzim katalase dan peroksidase, yang berfungsi menekan akumulasi ROS pada kondisi salinitas (Jiang et al., 2024).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa aplikasi ABA secara eksogen dapat meningkatkan toleransi tanaman padi terhadap cekaman salinitas melalui perbaikan status air, penurunan kebocoran elektrolit, dan pengurangan stres oksidatif (Feng et al., 2023). Namun, efektivitas ABA sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan fase pertumbuhan tanaman, sehingga kajian lebih lanjut masih diperlukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji respons morfologis, fisiologis, biokimia, dan molekuler padi ketan hitam terhadap cekaman salinitas dengan menitikberatkan pada peran asam absisat sebagai regulator utama toleransi stres secara *in vitro*.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Nutrasetikal dan Farmasetikal, UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (CDAST), Universitas Jember. Penelitian dilakukan dalam kondisi laboratorium terkontrol dengan sistem kultur *in vitro*. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi benih padi ketan hitam (*Oryza sativa* L. var. *glutinosa*), media Murashige and Skoog (MS), natrium klorida (NaCl) sebagai agen cekaman salinitas, asam absisat (ABA), akuades steril, alkohol, dan bahan kimia pendukung analisis fisiologis dan biokimia. Alat yang digunakan antara lain botol kultur, *laminar air flow*, autoklaf, oven, timbangan analitik, mikropipet, sentrifus, dan spektrofotometer UV-Vis.

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap faktorial dengan dua faktor. Faktor pertama adalah tingkat salinitas, yaitu tanpa NaCl (0 mM) dan cekaman salinitas NaCl (150 mM). Faktor kedua adalah perlakuan hormon, yaitu tanpa hormon (kontrol) dan pemberian hormon (ABA). Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak 6 kali sehingga diperoleh sebanyak 24 unit percobaan. Benih padi disterilisasi, kemudian ditanam pada media MS. Setelah tanaman tumbuh dan mencapai fase awal pertumbuhan, eksplan disubkultur ke media perlakuan yang mengandung hormon ABA dan NaCl sesuai taraf salinitas. Kultur dipelihara pada suhu ruang $\pm 25^\circ\text{C}$ dengan fotoperiode terkontrol hingga akhir pengamatan.

Variabel pengamatan meliputi parameter morfologis (tinggi tanaman, panjang akar, dan jumlah akar), parameter fisiologis (kandungan air relatif dan kebocoran elektrolit), serta parameter biokimia (kandungan hidrogen peroksida dan malondialdehid). Pengukuran parameter dilakukan untuk mengetahui respons cekaman dan pertahanan tanaman. Data hasil pengamatan dianalisis menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA). Apabila hasil menunjukkan perbedaan nyata, dilanjutkan dengan uji *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf kepercayaan 95%. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak pengolahan data statistik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi

Pengukuran tinggi tanaman dan panjang akar merupakan parameter penting yang bertujuan untuk mengukur variasi morfologi tanaman yang terjadi sebagai respons terhadap kondisi stres salinitas. Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 1, terlihat jelas bahwa terdapat variasi di antara tanaman padi ketan hitam yang mengalami kondisi stres salinitas. Tanaman padi ketan hitam menunjukkan tinggi optimal pada perlakuan 0 mM NaCl, dengan tinggi rata-rata 36,3 cm. Perlakuan salin menunjukkan penurunan tinggi tanaman dengan rata-rata



32,7 cm. Perlakuan ABA dan Salin+ABA memiliki tinggi yang relatif sama, yaitu masing-masing 18,5 cm dan 19 cm.

Tabel 1. Hasil analisis morfologi tanaman cekaman salinitas

Perlakuan	Tinggi tanaman (cm)	Panjang akar (cm)	Jumlah akar (helai)
Kontrol	36,3 ± 0,58 ^a	2,70 ± 0,52 ^a	18 ± 3 ^a
ABA	18,5 ± 0,5 ^c	2,37 ± 0,42 ^{ab}	8 ± 2,65 ^b
Salin	32,7 ± 3,4 ^b	2,83 ± 0,7 ^a	10 ± 2,3 ^b
Salin+ABA	19,0 ± 2 ^c	1,60 ± 0,20 ^b	8 ± 2,5 ^b

Morfologi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa cekaman salinitas menyebabkan penurunan tinggi tanaman padi ketan hitam. Pengamatan parameter morfologi yang meliputi tinggi tanaman, panjang akar, dan jumlah akar menunjukkan bahwa cekaman salinitas memberikan dampak nyata terhadap pertumbuhan awal padi ketan hitam secara *in vitro*. Perlakuan salinitas menyebabkan penurunan tinggi tanaman dibandingkan kontrol tanpa cekaman, yang mencerminkan terhambatnya laju pertumbuhan akibat akumulasi ion garam yang bersifat toksik bagi sel tanaman. Kondisi ini berhubungan dengan gangguan aktivitas fotosintesis serta tekanan osmotik yang menurunkan kemampuan tanaman dalam melakukan ekspansi sel. Hasil ini sejalan dengan laporan Srivastava dan Sharma (2021) yang menyatakan bahwa peningkatan taraf salinitas hingga 160 mM NaCl menyebabkan penurunan tinggi tanaman padi secara bertahap akibat akumulasi ion toksik dan berkurangnya efisiensi fotosintesis.

Pada parameter panjang akar, perlakuan salinitas tidak menunjukkan perbedaan nyata dibandingkan kontrol, namun jumlah akar mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi cekaman, tanaman cenderung menekan pembentukan akar baru sebagai bentuk strategi adaptif untuk mengurangi area kontak langsung dengan ion Na⁺ yang bersifat toksik. Akar merupakan organ pertama yang berinteraksi dengan lingkungan salin, sehingga respons adaptif lebih cepat terlihat pada jumlah akar dibandingkan panjangnya. Sackey et al. (2025) melaporkan bahwa tanaman padi yang tercekam salinitas akan mengurangi jumlah akar dan memfokuskan fungsinya pada pemeliharaan penyerapan air serta nutrisi esensial.

Aplikasi hormon asam absisat (ABA) secara eksogen menunjukkan pengaruh yang sangat nyata terhadap morfologi tanaman. Perlakuan ABA, baik pada kondisi tanpa cekaman maupun pada kondisi salin, menghasilkan tinggi tanaman terendah dibandingkan perlakuan lainnya. Fenomena ini berkaitan dengan sifat ABA sebagai hormon inhibitor pertumbuhan, terutama pada fase vegetatif awal. ABA lebih berperan dalam mengaktifkan mekanisme pertahanan tanaman terhadap cekaman dibandingkan mendorong pertumbuhan organ. Jiang et al. (2025)

melaporkan bahwa pemberian ABA pada fase pembibitan padi menyebabkan pertumbuhan tinggi tanaman menjadi stagnan karena sumber energi tanaman dialihkan untuk mekanisme adaptasi terhadap stres.

Selain itu, ABA juga memengaruhi arsitektur perakaran. Pada perlakuan ABA dan salin+ABA, panjang akar cenderung lebih rendah dibandingkan kontrol, disertai dengan penurunan jumlah akar. Kondisi ini menunjukkan bahwa ABA menekan inisiasi akar baru serta memperlambat pemanjangan akar. Chen et al. (2006) menjelaskan bahwa ABA dapat menghambat pertumbuhan akar primer dan menyebabkan pembesaran jaringan akar akibat peningkatan aktivitas pembelahan sel di bagian ujung akar sebagai respons protektif terhadap cekaman.

Kandungan Klorofil dan Karoten

Menurut data yang disajikan dalam Tabel 2, temuan menunjukkan perbedaan yang signifikan pada kadar klorofil a, klorofil b, karoten, dan total klorofil. Analisis klorofil total, klorofil a, dan klorofil b pada tanaman yang diberi cekaman salinitas menunjukkan kenaikan kadar klorofil dan karoten. Sebaliknya, perlakuan kontrol memiliki kadar klorofil yang terendah serta karoten terendah, yang menunjukkan efisiensi fotosintesis dan tanaman tidak tercekam. Perlakuan ABA menunjukkan peningkatan pada kadar klorofil.

Tabel 2. Hasil Analisis Kandungan Klorofil dan Karoten

Perlakuan	Klorofil a (mg/g)	Klorofil b (mg/g)	Karoten (mg/g)	Total Klorofil (mg/g)
Kontrol	3,79 ± 0,03 ^a	2,64 ± 0,08 ^a	1,97 ± 0,05 ^a	6,42 ± 0,09 ^a
ABA	9,32 ± 0,20 ^b	5,79 ± 0,03 ^b	7,16 ± 2,27 ^b	15,11 ± 0,89 ^b
Salin	9,66 ± 0,11 ^b	7,24 ± 0,13 ^b	6,15 ± 0,42 ^b	16,9 ± 0,25 ^b
Salin+ABA	6,24 ± 0,11 ^c	4,09 ± 0,19 ^c	6,74 ± 0,69 ^b	10,33 ± 0,30 ^c

Kandungan Klorofil dan Karoten

Hasil penelitian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa cekaman salinitas memengaruhi kandungan klorofil tanaman padi ketan hitam secara signifikan. Pada kondisi salin, terjadi perubahan kadar klorofil yang mengindikasikan adanya gangguan pada sistem fotosintesis. Perlakuan salin menunjukkan adanya peningkatan klorofil a sebagai mekanisme menghadapi cekaman, namun perlakuan salin juga menunjukkan peningkatan karoten sebagai indikator tanaman tercekam. Cekaman salinitas menyebabkan akumulasi ion Na⁺ dan Cl⁻ di jaringan daun, yang berpotensi merusak struktur kloroplas serta menurunkan stabilitas membran tilakoid. Kerusakan ini berdampak langsung pada degradasi klorofil dan menurunnya efisiensi fotosintesis. Kondisi tersebut sejalan dengan laporan Zhang et al. (2022) dan Zou et al. (2024) yang menyatakan bahwa akumulasi Na⁺ pada daun menyebabkan klorosis serta penurunan kapasitas fotosintesis akibat rusaknya kloroplas.

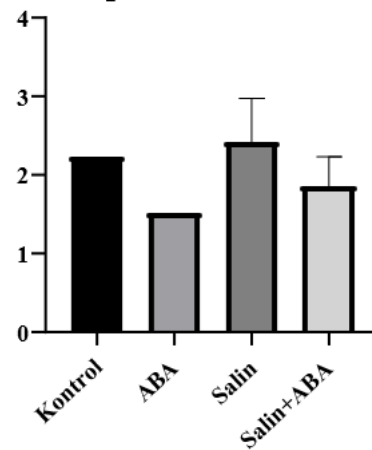


Aplikasi ABA secara eksogen menunjukkan pengaruh yang sangat nyata terhadap kandungan klorofil a, klorofil b, dan total klorofil. Perlakuan ABA meningkatkan kadar klorofil dibandingkan kontrol, baik pada kondisi tanpa cekaman maupun pada kondisi salinitas. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa ABA berperan dalam mempertahankan stabilitas pigmen fotosintetik selama tanaman berada pada kondisi stres. ABA diketahui mampu menurunkan akumulasi ROS melalui peningkatan aktivitas enzim antioksidan, sehingga dapat menghambat proses degradasi klorofil akibat stres oksidatif. Hal ini sesuai dengan temuan Chen et al. (2022) yang melaporkan bahwa pemberian ABA secara eksogen mampu menurunkan kandungan H_2O_2 dan MDA, sekaligus mempertahankan kadar klorofil pada tanaman padi fase vegetatif. ABA juga berperan dalam menjaga keseimbangan ionik sel, khususnya dalam mempertahankan rasio Na^+/K^+ yang lebih stabil. Keseimbangan ini penting untuk menjaga integritas membran kloroplas serta aktivitas enzim yang terlibat dalam biosintesis klorofil. Jiang et al. (2024) menyatakan bahwa ABA berkontribusi dalam mengurangi akumulasi Na^+ dan meningkatkan kandungan K^+ di jaringan tanaman, sehingga mampu meminimalkan kerusakan pigmen fotosintetik akibat cekaman salinitas.

Pada parameter klorofil a dan klorofil b, respons tanaman terhadap ABA menunjukkan bahwa kedua jenis klorofil tersebut meningkat secara simultan, yang mengindikasikan terjaganya fungsi kompleks fotosistem I dan II. Peningkatan total klorofil pada perlakuan ABA mencerminkan bahwa proses fotosintesis berpotensi tetap berlangsung lebih stabil meskipun tanaman berada pada kondisi tercekam. Dengan demikian, ABA berperan sebagai regulator fisiologis yang mendukung mekanisme toleransi tanaman melalui perlindungan aparatus fotosintetik.

Kandungan H_2O_2

Hidrogen peroksida (H_2O_2) merupakan salah satu bentuk utama *reactive oxygen species* (ROS) yang terakumulasi pada jaringan tanaman ketika mengalami cekaman abiotik, termasuk salinitas. Peningkatan H_2O_2 sering digunakan sebagai indikator terjadinya stres oksidatif karena senyawa ini bersifat toksik pada konsentrasi tinggi dan mampu menyebabkan kerusakan lipid membran, protein, serta asam nukleat. Pada tanaman yang mengalami cekaman salinitas menunjukkan peningkatan kandungan H_2O_2 , sedangkan perlakuan ABA mampu menurunkan kandungan H_2O_2 pada tanaman dalam kondisi tercekam salinitas.



Gambar 1. H_2O_2 pada tanamn padi ketan hitam

Hasil penelitian pada Gambar 1 menunjukkan bahwa cekaman salinitas secara nyata meningkatkan kandungan H_2O_2 pada tanaman padi ketan hitam. Kondisi ini berkaitan dengan terganggunya keseimbangan ionik dan tekanan osmotik akibat akumulasi Na^+ dan Cl^- , yang selanjutnya memicu peningkatan aktivitas respirasi dan gangguan pada rantai transpor elektron di kloroplas serta mitokondria. Gangguan tersebut menyebabkan terbentuknya ROS dalam jumlah berlebih, termasuk H_2O_2 . Fenomena ini sejalan dengan pernyataan Parveen et al. (2021) dan Kumar et al. (2024) yang menyebutkan bahwa salinitas meningkatkan produksi ROS akibat ketidakseimbangan metabolisme seluler dan kerusakan sistem fotosintesis.

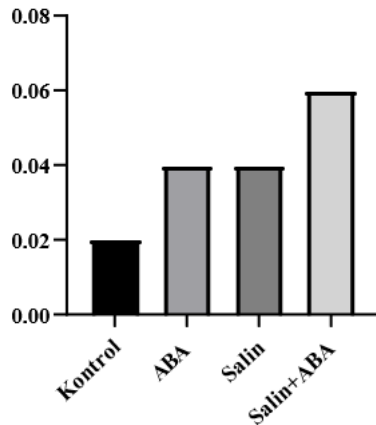
Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Fathi et al. (2025) yang melaporkan bahwa aplikasi ABA pada tanaman padi tercekam salinitas mampu menurunkan kandungan H_2O_2 secara signifikan, sekaligus menurunkan tingkat kerusakan oksidatif yang tercermin dari rendahnya nilai MDA. Hal ini menunjukkan adanya keterkaitan erat antara penurunan H_2O_2 dan stabilitas membran sel tanaman. Selain itu, ABA juga berperan dalam menjaga homeostasis ionik, khususnya dengan menekan akumulasi Na^+ dan mempertahankan rasio Na^+/K^+ yang lebih seimbang. Kondisi ionik yang stabil akan menurunkan gangguan metabolisme sel dan mengurangi pembentukan ROS. Dengan demikian, penurunan H_2O_2 pada perlakuan ABA tidak hanya disebabkan oleh peningkatan...

Kandungan Prolin

Prolin merupakan asam amino nonesensial yang berperan penting sebagai osmoprotektan, penstabil struktur protein dan membran sel, serta penyangga keseimbangan redoks pada tanaman yang mengalami cekaman abiotik. Akumulasi prolin secara umum digunakan sebagai indikator fisiologis tingkat stres, khususnya stres osmotik yang disebabkan oleh salinitas. Peningkatan pada perlakuan salin menunjukkan bahwa prolin berperan sebagai salah satu



mekanisme adaptif utama tanaman dalam menghadapi tekanan osmotik akibat akumulasi ion Na^+ dan Cl^- . Akumulasi prolin membantu mempertahankan potensial air sel, menjaga turgor, serta melindungi komponen seluler dari kerusakan struktural. Penambahan ABA berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kadar prolin pada tanaman.



Gambar 2. Kadar prolin

Hasil penelitian pada Gambar 2 menunjukkan bahwa cekaman salinitas secara nyata meningkatkan kadar prolin pada tanaman. Kadar prolin terendah terdapat pada tanaman kontrol, yang menunjukkan bahwa tanaman berada dalam kondisi normal. Penambahan ABA secara eksogen berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kadar prolin, yang ditunjukkan dari kadar prolin pada perlakuan ABA yang sama seperti ketika tanaman mengalami cekaman salinitas. Peningkatan salinitas berkorelasi dengan peningkatan prolin berdasarkan Jia et al. (2020), yang menyatakan bahwa cekaman salinitas secara langsung menginduksi biosintesis prolin sebagai respons perlindungan terhadap stres osmotik.

Aplikasi asam absisat (ABA) secara eksogen memperkuat akumulasi prolin, baik pada kondisi tanpa cekaman maupun pada kondisi salinitas. Hal ini menunjukkan bahwa ABA berperan sebagai regulator utama dalam jalur metabolisme prolin. ABA diketahui mampu menginduksi ekspresi gen yang terlibat dalam biosintesis prolin, khususnya gen yang mengode enzim Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5CS), yang merupakan enzim kunci dalam pembentukan prolin. Dengan meningkatnya aktivitas P5CS (Sabboni et al., 2021), akumulasi prolin di dalam sel menjadi lebih cepat dan efisien sehingga kemampuan tanaman dalam melakukan penyesuaian osmotik semakin meningkat. Temuan ini sejalan dengan Jiang et al. (2024) dan Cao et al. (2020) yang melaporkan bahwa pemberian ABA mampu meningkatkan kandungan prolin secara signifikan dan

berkontribusi terhadap peningkatan toleransi tanaman padi terhadap cekaman salinitas.

Selain berfungsi sebagai osmolit kompatibel, prolin juga berperan dalam perlindungan terhadap stres oksidatif. Prolin mampu menetralkan *reactive oxygen species* (ROS) secara tidak langsung serta membantu mempertahankan stabilitas struktur membran dan protein. Dengan demikian, peningkatan prolin berkorelasi dengan penurunan tingkat kerusakan oksidatif pada tanaman tercekam (Kumar et al., 2021). Prolin juga berfungsi sebagai cadangan karbon dan nitrogen yang dapat dimobilisasi kembali ketika kondisi lingkungan kembali normal. Peran ini menjadikan prolin tidak hanya penting selama fase cekaman, tetapi juga mendukung pemulihan pertumbuhan tanaman pascacekaman. Nguyen et al. (2021) menyatakan bahwa prolin merupakan metabolit multifungsi yang berperan dalam perlindungan sel sekaligus dalam proses pemulihan fisiologi tanaman.

KESIMPULAN

Cekaman salinitas secara nyata memengaruhi respons morfologi, fisiologi, dan biokimia tanaman padi ketan hitam. Pada parameter morfologi, cekaman salinitas menyebabkan penurunan tinggi tanaman dan jumlah akar, sedangkan panjang akar relatif lebih stabil. Penurunan tinggi tanaman menunjukkan terhambatnya pertumbuhan vegetatif akibat gangguan keseimbangan ionik dan tekanan osmotik. Gangguan pada sistem fotosintesis menunjukkan perubahan kandungan klorofil dan karoten, yang menunjukkan terjadinya kerusakan pigmen fotosintetik sekaligus aktivasi mekanisme protektif melalui pigmen pelindung.

Cekaman salinitas juga meningkatkan akumulasi H_2O_2 sebagai indikator meningkatnya stres oksidatif dan ketidakseimbangan metabolisme seluler, yang berpotensi menyebabkan kerusakan membran dan komponen sel lainnya. Sebagai respons adaptif, tanaman meningkatkan akumulasi prolin yang berperan sebagai osmoprotektan, penstabil membran dan protein, serta pendukung keseimbangan redoks, sehingga membantu mempertahankan turgor sel dan meningkatkan toleransi terhadap tekanan osmotik.

Dengan demikian, parameter morfologi (tinggi tanaman, panjang akar, dan jumlah akar), kandungan klorofil dan karoten, tingkat H_2O_2 , serta akumulasi prolin secara terpadu mampu merepresentasikan tingkat kerusakan sekaligus mekanisme adaptasi padi ketan hitam terhadap cekaman salinitas pada fase awal pertumbuhan secara *in vitro*.



DAFTAR PUSTAKA

- Cao, X., Wu, L., Wu, M., Zhu, C., Jin, Q., & Zhang, J. (2020). Absciscic acid mediated proline biosynthesis and antioxidant ability in roots of two different rice genotypes under hypoxic stress. *BMC Plant Biology*, 20(1), 198.
- Chen, C. W., Yang, Y. W., Lur, H. S., Tsai, Y. G., & Chang, M. C. (2006). A novel function of absciscic acid in the regulation of rice (*Oryza sativa* L.) root growth and development. *Plant and Cell Physiology*, 47(1), 1–13.
- Chen, G., Zheng, D., Feng, N., Zhou, H., Mu, D., Zhao, L., & Huang, A. (2022). Physiological mechanisms of ABA-induced salinity tolerance in leaves and roots of rice. *Scientific Reports*, 12(1), 8228.
- Chunthaburee, S., Dongsansuk, A., Sanitchon, J., Pattanagul, W., & Theerakulpisut, P. (2016). Physiological and biochemical parameters for evaluation and clustering of rice cultivars differing in salt tolerance at seedling stage. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(4), 467–477.
- Cutler, S. R., Rodriguez, P. L., Finkelstein, R. R., & Abrams, S. R. (2010). Absciscic acid: Emergence of a core signaling network. *Annual Review of Plant Biology*, 61(1), 651–679.
- Fathi, A., Shiade, S. R. G., Saleem, A., Shohani, F., Fazeli, A., Riaz, A., & Rahimi, M. (2025). Reactive oxygen species (ROS) and antioxidant systems in enhancing plant resilience against abiotic stress. *International Journal of Agronomy*, 2025(1), 8834883.
- Feng, Z., Lu, G., Sun, M., Jin, Y., Xu, Y., Liu, X., & Liang, Z. (2023). Comparative study of the priming effect of absciscic acid on tolerance to saline and alkaline stresses in rice seedlings. *Agronomy*, 13(11), 2698.
- Haque, M. A., Rafii, M. Y., Yusoff, M. M., Ali, N. S., Yusuff, O., Datta, D. R., & Iqbal, M. F. (2021). Advanced breeding strategies and future perspectives of salinity tolerance in rice. *Agronomy*, 11(8), 1631.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681.
- Jia, J., Bai, J., Wang, W., Yin, S., Zhang, G., Zhao, Q., & Cui, B. (2020). Salt stress alters the short-term responses of nitrous oxide emissions to the nitrogen addition in salt-affected coastal soils. *Science of the Total Environment*, 742, 140124.
- Jiang, W., Wang, X., Wang, Y., Du, Y., Zhang, S., Zhou, H., & Zhao, L. (2024). S-ABA enhances rice salt tolerance by regulating Na⁺/K⁺ balance and hormone homeostasis. *Metabolites*, 14(4), 181.
- Jiang, Y., Jiang, S., & Liu, L. (2025). Understanding the multifaceted role of ABA signaling in orchestrating plant developmental transition. *Stress Biology*, 5(1), 5.
- Kumar, S., Li, G., Yang, J., Huang, X., Ji, Q., Liu, Z., & Hou, H. (2021). Effect of salt stress on growth, physiological parameters, and ionic concentration of water dropwort (*Oenanthe javanica*) cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 12, 660409.
- Kumar, V., Srivastava, A. K., Sharma, D., Pandey, S. P., Pandey, M., Dudwadkar, A., & Das, B. K. (2024). Antioxidant defense and ionic homeostasis govern stage-specific response of salinity stress in contrasting rice varieties. *Plants*, 13(6), 778.
- Nguyen, H. T. T., Das Bhowmik, S., Long, H., Cheng, Y., Mundree, S., & Hoang, L. T. M. (2021). Rapid accumulation of proline enhances salinity tolerance in Australian wild rice *Oryza australiensis* Domin. *Plants*, 10(10), 2044. <https://doi.org/10.3390/plants10102044>
- Parveen, A., Ahmar, S., Kamran, M., Malik, Z., Ali, A., Riaz, M., & Ali, S. (2021). Absciscic acid signaling reduced transpiration flow, regulated Na⁺ ion homeostasis and antioxidant enzyme activities to induce salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101808.
- Sabbioni, G., Funck, D., & Forlani, G. (2021). Enzymology and regulation of δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase 2 from rice. *Frontiers in Plant Science*, 12, 672702.
- Sackey, O. K., Feng, N., Mohammed, Y. Z., Dzou, C. F., Zheng, D., Zhao, L., & Shen, X. (2025). A comprehensive review on rice responses and tolerance to salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1561280.
- Srivastava, S., & Sharma, P. K. (2022). Morpho-physiological and biochemical tolerance mechanisms in two varieties of *Oryza sativa* to salinity. *Russian Journal of Plant Physiology*, 69(2), 37.
- Zhao, C., Zhang, H., Song, C., Zhu, J. K., & Shabala, S. (2020). Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *The Innovation*, 1(1).
- Zuo, G., Feng, N., Wang, S., Yin, L., & Zheng, D. (2024). Rice (*Oryza sativa* L.) exhibits differential responses to salt stress and salt shock in electron transfer efficiency. *Plant Stress*, 12, 100481.