



RESPON MORFOLOGI DAN BIOKIMIA PADI LOKAL RAWA MERAH DAN PUTIH DIBAWAH CEKAMAN RENDAMAN SECARA IN VITRO

Ananda Geovani Nabila Septa Pranaja¹⁾, Tri Agus Siswoyo²⁾

¹⁾ Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember, Jember, Indonesia
Email: geovaninabila09@gmail.com

²⁾ Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember, Jember, Indonesia
Email: triagussiswono@gmail.com

Abstract

Local swamp rice represents a valuable genetic resource with potential tolerance to flooding stress. This study aimed to analyze the morphological and biochemical responses of local red and white swamp rice varieties to submergence stress under *in vitro* conditions. The research employed a quantitative approach using a factorial Completely Randomized Design (CRD) consisting of two factors: rice variety and submergence treatment. Observed parameters included seed and plant morphology, total flavonoid content, total phenolic content, and soluble protein content in seeds and leaves. The results showed that local red and white swamp rice varieties exhibited better adaptation to submergence stress than several commercial rice varieties, as indicated by relatively greater plant height and root length under submerged conditions. The local red swamp rice variety exhibited the highest flavonoid and phenolic contents among all tested varieties, while submergence treatment increased flavonoid, phenolic, and soluble protein contents in most varieties. The increase in bioactive compounds and soluble proteins reflects physiological responses and defense mechanisms against oxidative stress induced by submergence. These findings suggest that local swamp rice, particularly the red swamp rice variety, has significant potential as a genetic resource for developing submergence-tolerant rice cultivars as well as a functional food source with high bioactive compound content.

Keywords: local swamp rice, submergence stress, plant morphology, flavonoids, soluble protein.

Abstrak

Padi rawa lokal merupakan sumber plasma nutfah yang berpotensi memiliki toleransi tinggi terhadap cekaman genangan air. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons morfologis dan biokimia padi rawa lokal merah dan putih terhadap cekaman rendaman secara *in vitro*. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan acak lengkap (RAL) faktorial yang terdiri atas faktor varietas dan perlakuan rendaman. Parameter yang diamati meliputi morfologi biji dan tanaman, kandungan flavonoid total, fenolik total, serta protein terlarut pada biji dan daun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa padi rawa lokal merah dan putih memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap cekaman rendaman dibandingkan beberapa varietas komersial, yang ditunjukkan oleh tinggi tanaman dan panjang akar yang relatif lebih tinggi pada kondisi rendaman. Varietas padi rawa lokal merah memiliki kandungan flavonoid dan fenolik tertinggi dibandingkan varietas lainnya, sedangkan perlakuan rendaman meningkatkan kandungan flavonoid, fenolik, dan protein terlarut pada sebagian besar varietas yang diuji. Peningkatan senyawa bioaktif dan protein terlarut menunjukkan adanya respons fisiologis dan mekanisme pertahanan tanaman terhadap stres oksidatif akibat rendaman. Temuan ini mengindikasikan bahwa padi rawa lokal, khususnya padi rawa merah, memiliki potensi sebagai sumber daya genetik untuk pengembangan varietas padi toleran rendaman sekaligus sebagai pangan fungsional dengan kandungan senyawa bioaktif yang tinggi.

Kata kunci: padi rawa lokal, cekaman rendaman, morfologi tanaman, flavonoid, protein terlarut.



PENDAHULUAN

Lahan rawa merupakan ekosistem pertanian marginal yang dicirikan oleh kondisi genangan air yang tinggi dan berlangsung dalam waktu yang lama. Kondisi tersebut menjadi salah satu faktor pembatas utama dalam budidaya padi. Stres akibat genangan air dapat mengganggu pertumbuhan dan metabolisme tanaman karena terbatasnya ketersediaan oksigen di daerah perakaran, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan produktivitas tanaman (Ismail dkk., 2009). Dalam kondisi demikian, padi rawa lokal memiliki peran penting sebagai plasma nutfah adaptif karena telah mengalami proses seleksi alam yang memungkinkan tanaman beradaptasi terhadap lingkungan tergenang.

Padi rawa lokal, termasuk padi rawa merah dan padi rawa putih, memiliki keragaman genetik yang tinggi serta kemampuan beradaptasi terhadap berbagai tekanan lingkungan ekstrem. Kemampuan tersebut tercermin dari respons morfologis dan biokimia tanaman yang mendukung kelangsungan hidupnya pada kondisi genangan. Variasi respons yang ditunjukkan oleh masing-masing varietas mengindikasikan adanya perbedaan tingkat toleransi terhadap stres genangan. Oleh karena itu, padi rawa lokal berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber daya genetik dalam program pemuliaan untuk menghasilkan varietas padi yang lebih toleran terhadap genangan air (Jagadish dkk., 2012; Sariningtias dkk., 2021).

Pendekatan kultur *in vitro* digunakan dalam penelitian ini karena mampu menyediakan kondisi lingkungan yang terkontrol dan seragam, sehingga memungkinkan pengamatan respons tanaman terhadap stres genangan secara lebih akurat dan efisien. Metode ini juga mendukung pengujian toleransi stres pada tahap awal pertumbuhan serta mempercepat proses seleksi genotipe adaptif dalam waktu yang relatif singkat (Ashar dkk., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons morfologis dan biokimia padi rawa merah dan padi rawa putih lokal terhadap stres terendam air secara *in vitro* sebagai dasar pengembangan varietas padi yang toleran terhadap genangan dan berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret hingga September 2025 di Agrotechnopark Jubung serta Laboratorium Nutrasetikal dan Farmasi, Pusat Inovasi Teknologi dan Laboratorium Terpadu (UPT CDAST), Universitas Jember. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan padi rawa merah lokal dan padi rawa putih lokal sebagai bahan penelitian. Objek yang diamati adalah respons morfologis dan biokimia tanaman terhadap perlakuan stres terendam air secara *in vitro*.

Percobaan disusun menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dengan dua faktor, yaitu kondisi perendaman (tanpa perendaman dan dengan perendaman) serta varietas padi. Tahapan penelitian meliputi persiapan dan sterilisasi benih, pembuatan media Murashige dan Skoog (MS), kultur *in vitro*, serta pemberian perlakuan perendaman.

Variabel yang diamati meliputi parameter morfologis dan biokimia. Parameter morfologis terdiri atas tinggi tanaman, panjang akar, dan panjang kecambah, sedangkan parameter biokimia meliputi kandungan flavonoid total, fenolik total, dan protein larut. Pengamatan morfologis dilakukan secara langsung, sementara analisis biokimia dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Data yang diperoleh dianalisis secara statistik sesuai dengan rancangan percobaan yang digunakan dan diolah menggunakan perangkat lunak GraphPad Prism 10.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi Benih dan Tanaman

Gambar 1 menunjukkan perbedaan karakter morfologi benih padi rawa merah dan padi rawa putih lokal dibandingkan dengan beberapa varietas padi komersial, yaitu IR64, Gogo, Inpara 8, dan Inpari 30. Perbedaan tersebut terlihat pada bentuk, warna, dan ukuran benih yang mencerminkan adanya keragaman genetik antarvarietas. Keragaman morfologi ini dapat menjadi indikator penting dalam identifikasi varietas serta potensi adaptasinya terhadap kondisi lingkungan tertentu, termasuk lingkungan rawa yang tergenang.



Gambar 1. Perbandingan morfologi benih pada rawa lokal merah dan putih dengan varietas komersil (IR64, Gogo, Inpara 8, Inpara 30).

Pada pengamatan morfologi biji keenam varietas padi, terlihat adanya perbedaan ukuran, bentuk, dan warna baik pada gabah maupun beras. Varietas IR64 dan Inpara 30 memiliki bentuk gabah yang ramping dengan warna putih bersih. Varietas Gogo memiliki ukuran biji yang relatif lebih besar dengan warna putih kekuningan, sedangkan Inpara 8 menunjukkan bentuk biji yang ramping dan berwarna putih agak kusam. Berbeda dengan varietas komersial tersebut, padi rawa lokal merah dan putih memiliki warna aleuron merah dan putih dengan bentuk biji oval yang cenderung lebih kecil.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa varietas komersial memiliki ukuran gabah yang relatif seragam, yaitu sekitar 1,0 cm dengan panjang beras sekitar 0,8 cm. Sementara itu, padi rawa lokal memiliki ukuran gabah sekitar 0,8 cm dengan panjang beras berkisar antara 0,5–0,6 cm. Ukuran biji yang lebih besar dan seragam pada varietas komersial merupakan hasil seleksi pemuliaan yang berorientasi pada peningkatan keseragaman, bobot biji, dan preferensi konsumen (Park *et al.*, 2023).

Ukuran benih yang relatif lebih kecil pada padi rawa lokal menunjukkan adanya keragaman genetik dan adaptasi ekologis yang khas. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rahmawati *et al.* (2023) yang melaporkan bahwa padi lokal memiliki keragaman morfologi biji yang tinggi serta potensi genetik yang dapat dimanfaatkan dalam program pemuliaan tanaman. Selain itu, varietas padi rawa merah diketahui memiliki kandungan pigmen antosianin dan senyawa fenolik yang relatif tinggi, sehingga memiliki nilai fungsional dan gizi yang lebih baik meskipun ukuran bijinya lebih kecil dibandingkan varietas komersial (Sitaresmi *et al.*, 2023).

Tabel 1 menunjukkan bahwa perlakuan rendaman memberikan pengaruh nyata terhadap tinggi tanaman,

sedangkan pada parameter panjang akar tidak ditemukan perbedaan yang signifikan antarvarietas. Pada kondisi tanpa rendaman, varietas komersial Inpara 8 ($24,33 \pm 2,08$ cm) dan Inpara 30 ($27,00 \pm 1,73$ cm) memiliki tinggi tanaman yang lebih rendah dibandingkan varietas lainnya. Sebaliknya, padi rawa lokal merah ($41,00 \pm 1,00$ cm) dan padi rawa lokal putih ($36,33 \pm 3,79$ cm) menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang lebih baik, bahkan mendekati varietas unggul seperti IR64 ($39,33 \pm 1,15$ cm) dan Gogo ($39,00 \pm 1,00$ cm).

Tingginya pertumbuhan tanaman pada varietas padi rawa lokal mengindikasikan adanya vigor vegetatif yang kuat sebagai bentuk adaptasi terhadap lingkungan rawa yang sering mengalami genangan. Karakter pertumbuhan yang baik pada fase awal ini berpotensi mendukung kemampuan tanaman dalam menghadapi kondisi cekaman lingkungan, termasuk stres akibat rendaman. Dengan demikian, padi rawa lokal tidak hanya memiliki keragaman morfologi yang tinggi, tetapi juga menunjukkan potensi adaptif yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber plasma nutfah dalam pengembangan varietas padi toleran genangan.

Tabel 1. Perubahan morfologi pada varietas padi komersial dan padi lokal rawa di bawah cekaman rendaman

Perlakuan	Varietas	Tinggi Tanaman (cm)	Panjang Akar (cm)
(-) Rendaman	IR64	$39,33 \pm 1,15$	$3,67 \pm 0,58$
	Gogo	$39,00 \pm 1,00$	$5,50 \pm 1,32$
	Inpara 8	$24,33 \pm 2,08$	$3,50 \pm 0,87$
	Inpara 30	$27,00 \pm 1,73$	$2,50 \pm 0,50$
	Lokal Rawa Putih	$36,33 \pm 3,79$	$3,50 \pm 0,50$
	Lokal Rawa Merah	$41,00 \pm 1,00$	$4,17 \pm 1,04$
(+) Rendaman	IR64	$33,00 \pm 2,00$	$5,53 \pm 1,53$
	Gogo	$31,67 \pm 1,53$	$5,50 \pm 0,50$



Inpara 8	39,00 ± 2,65	6,67 ± 2,08
Inpari 30	39,33 ± 1,00	5,17 ± 0,76
Lokal Rawa Putih	45,33 ± 1,53	5,17 ± 1,26
Lokal Rawa Merah	45,67 ± 2,08	6,50 ± 0,50

Pada kondisi rendaman, varietas padi rawa lokal merah ($45,67 \pm 2,08$ cm) dan padi rawa lokal putih ($45,33 \pm 1,53$ cm) menunjukkan tinggi tanaman yang lebih tinggi dibandingkan varietas komersial seperti IR64 ($33,00 \pm 2,00$ cm) dan Gogo ($31,67 \pm 1,53$ cm). Hasil ini mengindikasikan bahwa padi rawa lokal memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kondisi genangan. Salah satu bentuk adaptasi tersebut adalah pemanjangan batang sebagai strategi *escape*, yaitu mekanisme yang memungkinkan bagian tajuk dan daun tetap berada di atas permukaan air sehingga proses fotosintesis dapat berlangsung secara optimal (Lin *et al.*, 2024). Adaptasi ini diketahui berkaitan dengan aktivitas gen-gen yang berperan dalam toleransi genangan, seperti SK1, SK2, dan SUB1A, yang mengatur respons pertumbuhan tanaman pada kondisi terendam.

Parameter panjang akar menunjukkan pola respons yang berbeda antarvarietas. Pada kondisi tanpa rendaman, varietas Gogo memiliki panjang akar tertinggi (5,50 cm), sedangkan Inpari 30 memiliki panjang akar terendah (2,50 cm). Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi kemampuan perkembangan sistem perakaran pada kondisi normal. Sementara itu, pada kondisi rendaman terjadi peningkatan panjang akar pada beberapa varietas, terutama Inpara 8 (6,67 cm) dan padi rawa lokal merah (6,50 cm), yang memiliki panjang akar lebih tinggi dibandingkan varietas lainnya.

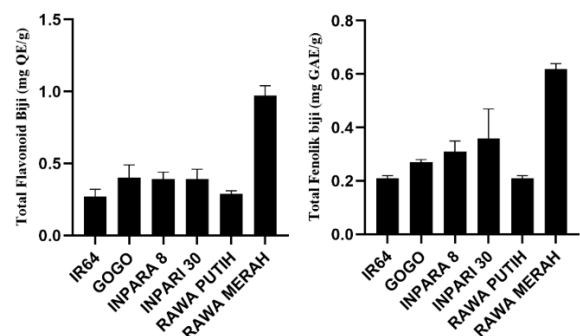
Peningkatan panjang akar pada kondisi genangan menunjukkan adanya respons adaptif tanaman dalam mempertahankan penyerapan air, nutrisi, dan suplai oksigen selama cekaman rendaman. Menurut Peralta *et al.* (2024), tanaman yang toleran terhadap genangan umumnya mampu membentuk jaringan aerenkima, yaitu jaringan berongga yang berfungsi meningkatkan transportasi oksigen dari bagian tajuk menuju akar. Keberadaan jaringan aerenkima

memungkinkan akar tetap berfungsi secara efektif meskipun berada pada lingkungan dengan kadar oksigen yang rendah.

Kandungan Flavonoid dan Fenolik

Flavonoid dan senyawa fenolik merupakan metabolit sekunder yang berperan penting dalam mekanisme pertahanan tanaman terhadap berbagai bentuk cekaman lingkungan. Pada biji padi, senyawa tersebut umumnya terakumulasi pada lapisan aleuron, perikarp, testa (kulit biji), serta sebagian kecil pada endosperm. Kandungan flavonoid dan fenolik tidak hanya memengaruhi karakteristik warna biji, tetapi juga berkontribusi terhadap aktivitas antioksidan dan nilai fungsional pangan.

Hasil analisis kandungan flavonoid dan fenolik yang disajikan pada Gambar 2 menunjukkan adanya perbedaan kadar senyawa tersebut antarvarietas padi yang diamati. Variasi kandungan flavonoid dan fenolik mencerminkan perbedaan karakter genetik masing-masing varietas serta respons fisiologis tanaman terhadap kondisi lingkungan. Varietas dengan kandungan flavonoid dan fenolik yang lebih tinggi berpotensi memiliki kapasitas antioksidan yang lebih baik, sehingga mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres abiotik, termasuk cekaman rendaman.



Gambar 2. Grafik kandungan total Flavonoid dan Fenolik keenam jenis benih varietas padi.

Gambar 2 menunjukkan bahwa kandungan flavonoid total dan fenolik total pada biji padi berbeda nyata antarvarietas yang diamati. Varietas padi rawa lokal merah memiliki kandungan flavonoid dan fenolik total tertinggi



dibandingkan varietas lainnya. Tingginya kandungan kedua senyawa tersebut diduga berkaitan dengan keberadaan antosianin dan senyawa fenolik lain yang terakumulasi pada lapisan aleuron dan perikarp biji. Antosianin merupakan kelompok senyawa fenolik yang berperan sebagai antioksidan alami sekaligus memberikan warna merah pada biji padi.

Menurut Nayeem et al. (2021), varietas beras berpigmen seperti beras merah dan beras hitam umumnya memiliki kandungan fenolik dan flavonoid yang lebih tinggi dibandingkan varietas beras tidak berpigmen. Hal ini menunjukkan bahwa pigmen pada biji tidak hanya berfungsi sebagai penentu warna, tetapi juga berperan dalam mekanisme pertahanan tanaman melalui aktivitas antioksidan yang lebih tinggi. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sitaresmi et al. (2023) yang melaporkan bahwa padi beras merah memiliki kandungan senyawa bioaktif yang lebih tinggi dibandingkan padi beras putih, terutama flavonoid, fenolik, dan antosianin.

Hasil penelitian Yoon et al. (2025) menunjukkan bahwa kandungan flavonoid pada beras berpigmen dapat mencapai 9,5 mg QE/g, jauh lebih tinggi dibandingkan beras putih. Senyawa flavonoid dan fenolik berfungsi sebagai antioksidan alami yang mampu melindungi sel dari kerusakan akibat radikal bebas. Oleh karena itu, varietas dengan kandungan flavonoid dan fenolik yang tinggi cenderung memiliki aktivitas biologis yang lebih baik serta toleransi yang lebih tinggi terhadap berbagai cekaman lingkungan (Tyagi et al., 2022).

Tingginya kandungan senyawa fenolik dan flavonoid pada padi rawa lokal merah juga dapat dikaitkan dengan faktor genetik yang mengendalikan jalur biosintesis fenilpropanoid. Jalur metabolisme ini berperan penting dalam pembentukan berbagai metabolit sekunder, termasuk flavonoid dan antosianin. Kunnam et al. (2023) menjelaskan bahwa perbedaan ekspresi gen pada jalur fenilpropanoid dapat menyebabkan variasi akumulasi senyawa fenolik antarvarietas. Variasi genetik tersebut memungkinkan padi rawa lokal merah memiliki aktivitas biosintesis fenolik yang lebih tinggi dibandingkan varietas

lainnya. Dengan demikian, padi rawa lokal merah memiliki potensi bioaktif yang sangat baik, baik ditinjau dari kandungan fenolik maupun flavonoid, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai sumber pangan fungsional bernilai tinggi.

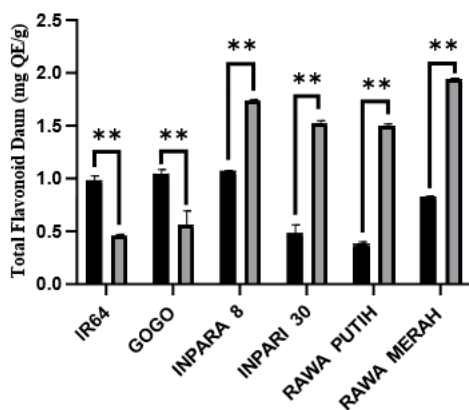
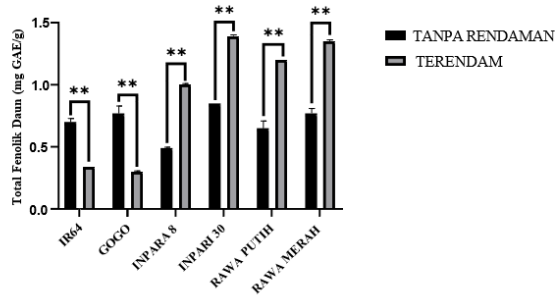
Selain perbedaan antarvarietas, perlakuan rendaman juga memengaruhi kandungan flavonoid total pada benih padi. Empat varietas menunjukkan peningkatan kandungan flavonoid setelah perlakuan rendaman, yaitu Inpara 8 (1,07–1,74 mg QE/g), Inpari 30 (0,48–1,53 mg QE/g), padi rawa lokal putih (0,39–1,50 mg QE/g), dan padi rawa lokal merah (0,83–1,94 mg QE/g). Sebaliknya, varietas IR64 dan Gogo mengalami penurunan kandungan flavonoid setelah perlakuan rendaman. Perbedaan respons tersebut menunjukkan bahwa cekaman rendaman memicu mekanisme pertahanan fisiologis yang berbeda pada setiap varietas, yang dipengaruhi oleh latar belakang genetik dan tingkat adaptasi terhadap lingkungan tergenang.

Peningkatan kandungan flavonoid pada beberapa varietas diduga berkaitan dengan aktivasi jalur fenilpropanoid sebagai respons terhadap stres lingkungan. Jalur ini berperan dalam sintesis senyawa antioksidan yang berfungsi menetralkan akumulasi spesies oksigen reaktif (reactive oxygen species/ROS) yang meningkat selama kondisi cekaman rendaman (Zhao et al., 2025). Akumulasi ROS yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan membran sel, protein, dan materi genetik tanaman, sehingga peningkatan sintesis flavonoid menjadi salah satu mekanisme penting dalam mempertahankan stabilitas fisiologis tanaman.

Ashikari et al. (2025) melaporkan bahwa varietas padi lokal yang secara ekologis berkembang pada habitat yang sering mengalami genangan umumnya memiliki sistem pertahanan antioksidan non-enzimatik yang lebih baik dibandingkan varietas yang berasal dari lingkungan normal. Karakteristik tersebut memungkinkan padi rawa lokal mempertahankan bahkan meningkatkan kandungan flavonoid selama periode rendaman. Oleh karena itu, tingginya kandungan flavonoid dan fenolik pada padi rawa lokal merah tidak hanya mencerminkan keunggulan nilai



gizi dan bioaktifnya, tetapi juga menunjukkan kemampuan adaptasi yang baik terhadap kondisi cekaman genangan. Temuan ini mengindikasikan bahwa padi rawa lokal merah berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber plasma nutfah dalam program pemuliaan untuk menghasilkan varietas padi yang toleran terhadap rendaman sekaligus memiliki nilai fungsional yang tinggi.



Gambar 3. Grafik kandungan total fenolik dan flavonoid daun keenam jenis padi pada kondisi tanpa rendaman dan dengan rendaman. Tanda * (Berbeda nyata) dan ** (Berbeda sangat nyata)

Peningkatan konsentrasi flavonoid pada Gambar 3 menunjukkan bahwa perlakuan rendaman dapat memicu akumulasi maupun pelepasan senyawa flavonoid dalam jaringan tanaman. Kondisi ini diduga berkaitan dengan aktivasi enzim tertentu serta perubahan struktur sel sebagai respons terhadap cekaman lingkungan. Menurut Kanan et al. (2024), perlakuan rendaman dapat mengubah profil metabolit sekunder tanaman, meskipun pada beberapa varietas beras parboiled dilaporkan terjadi penurunan

kandungan flavonoid total akibat degradasi senyawa selama proses perlakuan.

Tabel 2. Total Flavonoid dan Fenolik pada Daun Tanaman Padi

Perlakuan	Varietas	Total Flavonoid (mg QE/g)		Rasio Total Fenolik (%)	
		Total Flavonoid (mg QE/g)	Total Fenolik (mg GAE/g)	Rasio Total Fenolik (%)	Total Fenolik (%)
Rendaman	(-)	IR64	0,98 ± 0,05	0,70 ± 0,03	1,39 ± 0,11
		Gogo	1,04 ± 0,05	0,77 ± 0,06	1,36 ± 0,15
	Inpara 8	Inpara 8	1,07 ± 0,01	0,49 ± 0,01	2,16 ± 0,02
		Inpari 30	0,48 ± 0,09	0,85 ± 0,00	0,56 ± 0,11
	Rawa Putih	Rawa Putih	0,39 ± 0,02	0,65 ± 0,06	0,60 ± 0,04
		Rawa Merah	0,83 ± 0,01	0,77 ± 0,04	1,08 ± 0,07
	(+) Rendaman	IR64	0,46 ± 0,02	0,34 ± 0,00	1,34 ± 0,07
		Gogo	0,56 ± 0,14	0,30 ± 0,01	1,84 ± 0,49
		Inpara 8	1,74 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,75 ± 0,01
		Inpari 30	1,53 ± 0,02	1,39 ± 0,01	1,10 ± 0,02
		Rawa Putih	1,50 ± 0,02	1,20 ± 0,00	1,25 ± 0,01
		Rawa Merah	1,94 ± 0,01	1,35 ± 0,01	1,43 ± 0,01

Rawa Putih dari 0,65 menjadi 1,20 mg GAE/g, dan varietas Lokal Rawa Merah dari 0,77 menjadi 1,35 mg GAE/g. Peningkatan ini sejalan dengan hasil yang disampaikan oleh Singh et al. (2017) yang mengindikasikan bahwa proses perendaman dapat meningkatkan total *Phenolic Content* (TPC) pada gabah coklat, terutama pada kondisi optimal 33 °C. Menurut Tau dan Redillas (2025), mekanisme umum stres rendaman pada padi memang akan melibatkan ROS tinggi dan penekanan biosintesis polifenol dengan mengandalkan penyesuaian morfo-fisiologis pada tanaman.



Dibandingkan dengan data pada Tabel 2, terdapat fenomena menarik yang dijumpai pada varietas intoleran, seperti Gogo, yang mengalami peningkatan rasio TF/TP secara drastis pada saat perlakuan rendaman, dari sebesar 1,36% menjadi sebesar 1,84%. Teoritis, peningkatan rasio yang tinggi pada varietas intoleran ini sebenarnya bukanlah pertanda kuat adaptasi, melainkan merupakan bentuk respons stres oksidatif yang berlebihan, yang disebut “overshooting”. Padi Gogo, yang secara genetik tidak memiliki kemampuan “quiescence” (dormansi sementara) dan “escape” (pemanjangan cepat) seperti padi rawa, mengalami “kejutan fisiologis” pada saat terendam air. Hal ini memicu respons darurat jalur fenilpropanoid untuk menghasilkan flavonoid secara maksimum untuk mengatasi ledakan spesies oksigen reaktif (ROS). Menurut Ramešová et al. (2012), peningkatan rasio flavonoid secara tiba-tiba pada tanaman yang sensitif sebenarnya merupakan tanda kerusakan sistem pertahanan enzimatis, seperti enzim superoksida dismutase (SOD) dan katalase (CAT), yang sudah tidak mampu lagi mengatasi ledakan stres oksidatif, sehingga tanaman terpaksa mengalihkan semua energi metabolismenya untuk pertahanan sekunder flavonoid.

Berbeda dengan varietas toleran jenis Inpara dan Rawa Merah, meskipun varietas ini mengumpulkan kandungan fenolik dan flavonoid dalam jumlah total yang besar, rasio keduanya cenderung lebih stabil dan terkendali karena sistem fisiologis varietas toleran lebih siap menghadapi kondisi anaerob. Varietas Gogo memiliki rasio TF/TP tinggi sebagai upaya kompensasi “boros energi” yang pada akhirnya tidak berhasil mempertahankan tanaman karena tidak dibarengi dengan efisiensi pemakaian cadangan karbohidrat.

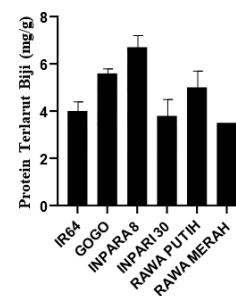
Pada hasil pengamatan secara fisiologis, menghasilkan dua implikasi, yang pertama pada profil total flavonoid atau total fenolik dapat menjadi penanda yang bisa mendukung toleransi rendaman antar-varietas, varietas dengan total flavonoid dan fenolik awal yang tinggi cenderung mempunyai *buffer* antioksidan lebih besar untuk menghadapi banjir (Basu et al., 2024). Kedua pada sisi pangan fungsional, varietas yang menjaga total flavonoid

dan fenolik relatif tinggi memberikan nilai tambah nutrasetikal saat dipanen pada lahan rawa rendaman, mengingat polifenol/flavonoid biji padi berasosiasi dengan kapasitas antioksidan dan bioaktivitas kesehatan (Zhao et al., 2025). Pada konteks anatomi yang terinterpretasi pada gambar 3 sebagian besar fenolik padi terlokalisasi pada perikarp-aleurone (bran), sehingga setiap perubahan proses panen akan sangat memengaruhi total flavonoid dan fenolik yang terukur (Ariñash et al., 2024).

Kandungan Protein Terlarut

Kandungan protein pada biji padi merupakan salah satu hal penting yang memengaruhi nilai gizi dan kualitas pangan pada tanaman padi. Gambar 4 menunjukkan hasil analisis total protein yang terkandung pada keenam varietas tanaman padi.

Pada Gambar 4 hasil menunjukkan kadar protein terlarut antar 3 varietas berbeda nyata signifikan dibandingkan dengan 3 varietas lainnya. Varietas Inpara 8 mempunyai kandungan protein terlarut sebesar 6,7 µg/mg, diikuti dengan varietas Gogo 5,6 µg/mg dan Rawa Putih 5,0 µg/mg, sedangkan pada varietas IR64, Inpari 30, dan Rawa Merah cenderung menunjukkan hasil yang lebih rendah berkisar antara 3,5–4,0 µg/mg.



Gambar 4. Grafik kandungan protein terlarut pada keenam jenis biji padi.

Riset global menunjukkan bahwa kandungan protein terlarut dalam biji sangat bervariasi antar varietasnya, dengan rentang antara 5,3 hingga 13,6% tergantung pada faktor genetik dan lingkungannya (Lou et al., 2023). Heritabilitas sifat protein tergolong rendah hingga menengah sekitar 13–58%, sehingga pengaruh lingkungan

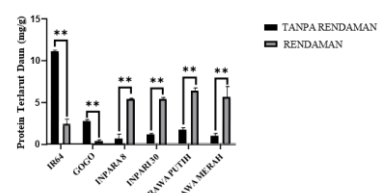


sangat besar dalam ekspresi nutrisi. Hal tersebut mendasari dari hasil gambar grafik di atas yang memiliki perbedaan mencolok antara varietas Inpara 8, Gogo, dan IR64. Sejarah pemuliaan tanaman padi di Indonesia, seperti IR64, lebih cenderung pada peningkatan hasil dan toleransi abiotik, bukan pada kandungan nutrisi (Sasmita & Nugraha, 2020). Namun, saat ini telah berkembang upaya biofortifikasi, varietas padi berpigmen serta beragam nutrisi telah dikembangkan lebih maju dan mulai dilepas untuk memperbaiki status gizi masyarakat (Sitaresmi et al., 2023). Varietas lokal seperti Lokal rawa putih meski belum umum dimanfaatkan dan dikembangkan menunjukkan kadar protein menengah dan berpotensi sebagai sumber plasma nutfah untuk pemuliaan nutrisi. Menggunakan donor tanaman seperti padi lokal rawa akan membantu memperbaiki kualitas gizi pada varietas unggul. Teknik pemuliaan tanaman seperti *Marker-assisted selection* (MAS) telah teridentifikasi dalam berbagai penelitian global sebagai peningkat kandungan protein secara genetis.

Meskipun kandungan protein terlarut hanya menyokong sebagian kecil dalam kandungan beras, sedikit peningkatan kandungan dapat menyumbang dampak besar pada gizi masyarakat yang makanan pokoknya bergantung pada beras. Dengan fondasi genetik serta teknologi pemuliaan yang memadai, varietas seperti Inpara 8 dan Gogo berpotensi menjadi pionir dalam mendukung ketahanan gizi sekaligus dapat membantu ketahanan pangan nasional.

Sedangkan kandungan protein terlarut tanaman merupakan fraksi protein yang larut dalam air maupun buffer dan biasanya diukur secara kuantitatif. Gambar 5 menunjukkan hasil analisis protein terlarut yang terkandung pada enam varietas tanaman padi dengan perlakuan rendaman dan tanpa rendaman. Hasil gambar 5 menunjukkan bahwa secara konsisten, perlakuan dengan cekaman rendaman menghasilkan kandungan protein terlarut yang lebih tinggi daripada perlakuan tanpa cekaman rendaman pada semua varietas padi yang diuji. Pada varietas Inpara 8 dan Inpara 30 menunjukkan peningkatan nilai protein total dari angka 0,65 $\mu\text{g}/\text{mg}$ menjadi lebih dari

5,43 $\mu\text{g}/\text{mg}$ saat diberi perlakuan rendaman. Hal ini secara langsung menunjukkan respon fisiologi tanaman yang kuat terhadap stres rendaman air. Pada beberapa varietas lain juga menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuannya, varietas Gogo menunjukkan peningkatan paling rendah berkisar 2,4%, sementara pada padi lokal Rawa putih dan Merah menunjukkan peningkatan nilai. Sedangkan kandungan protein terlarut tanaman merupakan fraksi protein yang larut dalam air maupun buffer dan biasanya diukur secara kuantitatif. Gambar 5 menunjukkan hasil analisis protein terlarut yang terkandung pada enam varietas tanaman padi dengan perlakuan rendaman dan tanpa rendaman. Hasil Gambar 5 menunjukkan bahwa secara konsisten, perlakuan dengan cekaman rendaman menghasilkan kandungan protein terlarut yang lebih tinggi daripada perlakuan tanpa cekaman rendaman pada semua varietas padi yang diuji. Pada varietas Inpara 8 dan Inpara 30 menunjukkan peningkatan nilai protein total dari angka 0,65 $\mu\text{g}/\text{mg}$ menjadi lebih dari 5,43 $\mu\text{g}/\text{mg}$ saat diberi perlakuan rendaman. Hal ini secara langsung menunjukkan respon fisiologi tanaman yang kuat terhadap stres rendaman air. Pada beberapa varietas lain juga menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuannya. Varietas Gogo menunjukkan peningkatan paling rendah berkisar 2,4%, sementara pada padi lokal Rawa Putih dan Rawa Merah menunjukkan peningkatan nilai yang tinggi, yaitu dari 0,9% menjadi 6,4%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa varietas Lokal Rawa memiliki ketahanan protein yang lebih baik terhadap stres oksidatif akibat rendaman.



Gambar 5. Grafik kandungan protein terlarut pada keenam jenis padi pada kondisi (-) tanpa rendaman dan (+) rendaman. Tanda * (Berbeda nyata) dan ** (Berbeda sangat nyata).



Peningkatan kandungan protein terlarut di bawah perlakuan cekaman rendaman memiliki kaitan dengan respon adaptif metabolik, seperti peningkatan enzim antioksidan atau protein stres yang terakumulasi sebagai agen pertahanan. Menurut Lu et al. (2024), stres rendaman dapat memicu akumulasi enzim seperti SOD, CAT, dan GST yang dapat membantu menetralkan radikal bebas dan menjaga integritas membran sel. Mekanisme toleran rendaman pada padi telah banyak diteliti, seperti varietas yang mempunyai gen Sub1A dan dapat mengaktifkan strategi quiescence untuk bertahan tanpa merusak kualitas maupun kuantitas protein pada jaringan tanaman selama terendam (Singh et al., 2017).

Selain rendaman, cekaman abiotik lain seperti suhu rendah maupun perubahan metabolik juga dapat memengaruhi sintesis dan komposisi protein. Pada konteks rendaman, adaptasi terlihat dalam bentuk lonjakan atau stabilisasi kandungan proteinnya, seperti halnya yang dapat dilihat pada Gambar 5 varietas padi Lokal Rawa Merah dan Putih. Hasil akhir penelitian ini ditegaskan bahwa varietas padi yang menunjukkan kenaikan kandungan total protein signifikan selama perendaman seperti Rawa Putih dan Merah memiliki potensi sebagai kandidat unggul dalam pengembangan varietas toleran rendaman.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa cekaman rendaman memberikan pengaruh terhadap respons morfologis dan biokimia pada berbagai varietas padi yang diuji. Varietas padi rawa lokal merah dan padi rawa lokal putih menunjukkan kemampuan adaptasi yang lebih baik dibandingkan beberapa varietas komersial, yang ditunjukkan oleh pertumbuhan tinggi tanaman yang lebih tinggi pada kondisi rendaman. Respons tersebut mengindikasikan adanya mekanisme adaptasi morfologis yang mendukung toleransi tanaman terhadap kondisi genangan.

Pada aspek biokimia, varietas padi rawa lokal merah memiliki kandungan flavonoid dan fenolik tertinggi dibandingkan varietas lainnya. Tingginya kandungan

senyawa bioaktif tersebut berkaitan dengan keberadaan pigmen antosianin dan aktivitas jalur biosintesis fenilpropanoid yang berperan dalam mekanisme pertahanan tanaman terhadap stres oksidatif. Perlakuan rendaman juga meningkatkan kandungan flavonoid dan fenolik pada beberapa varietas, terutama padi rawa lokal merah dan putih, yang menunjukkan kemampuan sistem antioksidan dalam merespons cekaman lingkungan.

Selain itu, perlakuan rendaman meningkatkan kandungan protein terlarut pada seluruh varietas padi yang diuji, dengan peningkatan yang lebih menonjol pada varietas padi rawa lokal. Peningkatan kandungan protein terlarut menunjukkan adanya respons fisiologis dan metabolik yang berperan dalam mempertahankan fungsi sel selama kondisi terendam. Dengan demikian, padi rawa lokal merah dan padi rawa lokal putih memiliki potensi yang tinggi sebagai sumber plasma nutfah dalam program pemuliaan padi toleran rendaman sekaligus sebagai sumber pangan fungsional karena kandungan senyawa bioaktif dan protein yang relatif tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashar, J. R., Farhanah, A., Hamzah, P., Ismayanti, R., Tuhuteru, S., Yusuf, R., ... & Mardaleni, M. (2023). *Pengantar Kultur Jaringan Tanaman*. Penerbit Widina.
- Ashikari, M., Nagai, K., & Bailey-Serres, J. (2025). Surviving floods: Escape and quiescence strategies of rice coping with submergence. *Plant Physiology*, *197*(2), kiaf029.
- Avinash, G., Sharma, N., Prasad, K. R., Kaur, R., Singh, G., Pagidipala, N., & Thulasinathan, T. (2024). Unveiling the distribution of free and bound phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, and proanthocyanidins in pigmented and non-pigmented rice genotypes. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1324825.
- Basu, S., Kumari, S., & Kumar, G. (2024). Sub1 QTL confers submergence tolerance in rice through nitro-



- oxidative regulation and phytohormonal signaling. *Plant Physiology and Biochemistry*, 211, 108682.
- Ismail, A. M., Ella, E. S., Vergara, G. V., & Mackill, D. J. (2009). Mechanisms associated with tolerance to flooding during germination and early seedling growth in rice (*Oryza sativa*). *Annals of Botany*, 103(2), 197–209.
- Jagadish, S. V. K., Septiningsih, E. M., Kohli, A., Thomson, M. J., Ye, C., Redona, E., ... & Singh, R. K. (2012). Genetic advances in adapting rice to a rapidly changing climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(5), 360–373.
- Kanan, M. K. A., Nahar, T., Islam, N., Rahman, M. J., Ahmed, S., Kabir, M. S., & Ahmed, M. (2024). Impact of soaking and cooking treatments on the physicochemical and antioxidant properties of parboiled and non-parboiled rice (*Oryza sativa* L.). *Food Science and Technology International*, 30(2), 160–168.
- Kunnam, J., Pinta, W., Ruttanaprasert, R., Bunphan, D., Thabthimtho, T., & Aninbon, C. (2023). Stability of phenols, antioxidant capacity and grain yield of six rice genotypes. *Plants*, 12(15), 2787.
- Lin, C., Zhang, Z., Shen, X., Liu, D., & Pedersen, O. (2024). Flooding-adaptive root and shoot traits in rice. *Functional Plant Biology*, 51(1).
- Lou, G., Bhat, M. A., Tan, X., Wang, Y., & He, Y. (2023). Research progress on the relationship between rice protein content and cooking and eating quality and its influencing factors. *Seed Biology*, 2(1).
- Lu, H., Wang, M., Zhou, S., Chen, K., Wang, L., Yi, Z., ... & Zhang, Y. (2024). Chitosan oligosaccharides mitigate flooding stress damage in rice by affecting antioxidants, osmoregulation, and hormones. *Antioxidants*, 13(5), 521.
- Nayem, S., Venkidasamy, B., Sundararajan, S., Kuppuraj, S. P., & Ramalingam, S. (2021). Differential expression of flavonoid biosynthesis genes and biochemical composition in different tissues of pigmented and non-pigmented rice. *Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 884–893.
- Park, J. R., Seo, J., Park, S., Jin, M., Jeong, O. Y., & Park, H. S. (2023). Identification of potential QTLs related to grain size in rice. *Plants*, 12(9), 1766.
- Peralta Ogorek, L. L., Song, Z., Pellegrini, E., Liu, F., Tomasella, M., Nardini, A., & Pedersen, O. (2024). Root acclimations to soil flooding prime rice (*Oryza sativa* L.) for subsequent conditions of water deficit. *Plant and Soil*, 494(1), 529–546.
- Rahmawati, D., Santika, P., & Fauzi, D. R. R. (2023, April). Characterization of five local varieties of rice (*Oryza sativa* L.) in East Java, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1168, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.
- Ramešová, Š., Sokolová, R., Degano, I., Bulíčková, J., Žabka, J., & Gál, M. (2012). On the stability of the bioactive flavonoids quercetin and luteolin under oxygen-free conditions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402(2), 975–982.
- Sariningtias, N. W., Amirullah, J., & Ratmini, N. S. (2021). Genetic potential of local rice germplasm specific tidal swamps of South Sumatra: Potensi genetik plasma nutfah padi lokal spesifik rawa pasang surut Sumatera Selatan. *KaliAgri Journal*, 2(2), 12–18.
- Sasmita, P., & Nugraha, Y. (2020). Rice breeding strategy for climate resilience and value addition in Indonesia. *Strategies and Technologies for the Utilization and Improvement of Rice*, 67–82.
- Singh, A., Singh, Y., Mahato, A. K., Jayaswal, P. K., Singh, S., Singh, R., ... & Rai, V. (2020). Allelic sequence variation in the Sub1A, Sub1B and Sub1C genes among diverse rice cultivars and its association with submergence tolerance. *Scientific Reports*, 10(1), 8621.
- Singh, K., Simpasipan, P., Decharatnangkoon, S., & Utama-ang, N. (2017). Effect of soaking temperature and time on GABA and total phenolic content of germinated brown rice (*Phitsanulok 2*). *Current Applied Science and Technology*, 17(2), 224–232.



- Sitairesmi, T., Hairmansis, A., Widyastuti, Y., Susanto, U., Wibowo, B. P., Widiastuti, M. L., ... & Nugraha, Y. (2023). Advances in the development of rice varieties with better nutritional quality in Indonesia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100602.
- Tavu, L. E. J., & Redillas, M. C. F. R. (2025). Oxidative stress in rice (*Oryza sativa*): Mechanisms, impact, and adaptive strategies. *Plants*, 14(10), 1463.
- Tyagi, A., Lim, M. J., Kim, N. H., Barathikannan, K., Vijayalakshmi, S., Elahi, F., ... & Oh, D. H. (2022). Quantification of amino acids, phenolic compounds profiling from nine rice varieties and their antioxidant potential. *Antioxidants*, 11(5), 839.
- Yoon, N., Kim, Y., Chin, J. H., & Lee, S. (2025). Comparative analysis of chemical profiles and bioactive properties in six pigmented and non-pigmented rice varieties. *Chemistry*, 7(2), 58.
- Zhao, M., Xiao, X., Jin, D., Zhai, L., Li, Y., Yang, Q., ... & Tang, Q. (2025). Composition and biological activity of colored rice—A comprehensive review. *Foods*, 14(8), 1394.