Jurnal Biologi Tropis

Original Research Paper

Agronomic Performance of Gamma-Irradiated M6 Brown RiceGenotypes under Upland Conditions

A. A. Ketut Sudharmawan[1*], Wayan Wangiyana[1], I Gusti Putu Muliarta Aryana[1], Ni Wayan Sri Suliartini[1], Nur Mawadah Pratiwi[2]

[1]Department of Agroecotechnology, Faculty of Agriculture, University of Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram 83125, West Nusa Tenggara, Indonesia;

[2]Student of Department of Agroecotechnology, Faculty of Agriculture, University of Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram 83125, West Nusa Tenggara, Indonesia;

Article History
Received : October 09th, 2026
Revised : October 22th, 2026
Accepted : November 02th, 2026

*Corresponding Author: **A. A. Ketut Sudharmawan**, Department of Agroecotechnology, Faculty of Agriculture, University of Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram 83125, West Nusa Tenggara, Indonesia;
Email: aa_kt_sudharmawan@unram.ac.id

Abstract: Drought is a major constraint to rice production in upland environments; therefore, identifying genotypes with promising performance under these conditions is an important breeding objective. This study evaluated the agronomic performance of M6 brown rice mutant genotypes induced by gamma irradiation under field upland conditions. The available dataset comprised 15 entries (13 mutant lines and two check varieties) evaluated in a randomized complete block design with three replications. Ten quantitative traits were assessed, including days to flowering and harvest, plant height, total and productive tiller number, panicle length, leaf angle, filled and total grains per panicle, and 100-grain weight. Data were analyzed using analysis of variance at the 5% significance level; post-hoc comparisons were considered where appropriate. Significant genotypic effects were detected for total tiller number ($P = 0.039$), productive tiller number ($P = 0.002$), leaf angle ($P = 0.006$), days to flowering ($P = 0.027$), filled grains per panicle ($P = 0.005$), total grains per panicle ($P < 0.001$), and 100-grain weight ($P < 0.001$). Plant height, panicle length, and days to harvest did not differ significantly among entries. G27 1-20-19 flowered earliest (83 days) and combined a relatively high number of filled grains with a high leaf-angle value, whereas G27 1-20-6 had high numbers of filled and total grains. These entries warrant further evaluation across environments and seasons. The findings indicate agronomic potential under the tested conditions but do not, by themselves, establish drought tolerance.

Keywords: Agronomic traits; Brown rice; Gamma irradiation; Mutant rice; Upland.

Pendahuluan

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan komoditas pangan strategis yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan pangan. Di tengah keterbatasan lahan beririgasi dan meningkatnya ketidakpastian ketersediaan air, pengembangan padi pada lahan kering menjadi salah satu alternatif yang perlu didukung oleh bahan genetik dengan kinerja agronomis yang sesuai. Namun, produksi padi di lahan kering menghadapi kendala utama berupa ketersediaan air yang terbatas dan berubah sepanjang musim. Kekurangan air dapat menghambat pertumbuhan tanaman, mengganggu proses reproduksi, mengurangi pasokan asimilat, serta menurunkan pembentukan dan pengisian gabah. Oleh karena itu, evaluasi genotipe padi pada lingkungan lahan kering perlu memperhatikan karakter fenologi dan komponen hasil yang berhubungan dengan keberhasilan pembentukan gabah (Blum, 2011; Farooq et al., 2009; Sudharmawan et al., 2026a).

Induksi mutasi merupakan salah satu pendekatan pemuliaan tanaman untuk memperluas keragaman genetik yang dapat dimanfaatkan dalam seleksi. Iradiasi gamma

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

© 2026 The Author(s). This article is open access

telah digunakan untuk menghasilkan populasi mutan pada berbagai tanaman, termasuk padi. Setelah generasi mutan dimajukan dan diseleksi, variasi fenotipik yang muncul dapat dievaluasi untuk mengidentifikasi karakter yang berpotensi mendukung perbaikan tanaman (Ahloowalia et al., 2004; Kharkwal & Shu, 2009). Pada padi beras merah, pengembangan galur mutan juga relevan karena komoditas ini memiliki nilai pangan dan fungsional. Penelitian terdahulu pada padi beras merah G16 hasil iradiasi gamma melaporkan adanya keragaman karakter morfologi dan agronomis pada generasi mutan, sehingga populasi tersebut berpotensi menjadi sumber bahan seleksi untuk penelitian lanjutan (Sudharmawan et al., 2022; Suliartini et al., 2022; Chandraningsih et al., 2023).

Evaluasi agronomis pada generasi lanjut tetap diperlukan karena penampilan suatu genotipe dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat tanaman tumbuh. Karakter umur berbunga, jumlah anakan produktif, jumlah gabah berisi per malai, jumlah gabah total per malai, dan bobot gabah dapat memberikan informasi awal mengenai perkembangan tanaman serta pembentukan hasil. Umur berbunga yang lebih awal, misalnya, dapat membantu tanaman menyelesaikan fase reproduktif sebelum ketersediaan air semakin terbatas, tetapi karakter tersebut tidak dengan sendirinya membuktikan toleransi terhadap kekeringan. Demikian pula, sudut daun dapat menggambarkan perbedaan arsitektur tajuk dan berhubungan dengan distribusi cahaya di dalam kanopi, tetapi tidak dapat digunakan sebagai indikator langsung toleransi kekeringan tanpa dukungan pengukuran fisiologis dan penggunaan air (Blum, 2011; Farooq et al., 2009; Peng et al., 2008; Sudharmawan et al., 2026b).

Meskipun penelitian mengenai mutan padi beras merah G16 telah melaporkan variasi morfologi serta respons fisiologis pada kondisi cekaman air, informasi komparatif mengenai kinerja sejumlah genotipe M6 berdasarkan karakter fenologi, morfologi, dan komponen hasil pada kondisi lapangan lahan kering masih perlu diperkuat. Evaluasi pada satu lingkungan dapat digunakan sebagai skrining awal untuk mengidentifikasi genotipe yang layak diuji lebih lanjut, tetapi belum cukup untuk memisahkan pengaruh genotipe dari respons spesifik terhadap lingkungan atau untuk menetapkan toleransi kekeringan. Pengujian lanjutan perlu menggunakan lokasi dan musim yang berbeda, kondisi ketersediaan air yang terukur, serta karakter fisiologis yang relevan (Chandraningsih et al., 2024; Raihanun et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi keragaman karakter agronomis 15 entri padi beras merah M6 hasil iradiasi gamma yang terdiri atas 13 galur mutan dan dua entri pembanding pada kondisi lapangan lahan kering, serta mengidentifikasi entri dengan kombinasi karakter fenologi dan komponen hasil yang menjanjikan untuk evaluasi pemuliaan berikutnya.

Bahan dan Metode

Percobaan dilaksanakan pada lahan kering di Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, Indonesia, menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) dengan tiga ulangan. Materi penelitian terdiri atas 15 entri, yaitu 13 galur mutan dan dua entri pembanding, Inpari-42 dan Gamagora. Genotipe tersebut adalah Inpari-42, G15 4-20-13, G52 3-9-13, G27 1-20-6, G15 4-20-20, Gamagora, G12 7-10-6, G27 1-20-19, G20 8-3-5, G28 12-20-6, G13 11-16-11, G13 12-2-8, G63 17-7-3, G63 11-8-6, dan G63 5-14-10. Persiapan benih meliputi pemilihan benih yang bernas dan sehat, perendaman selama 24 jam dalam larutan zat pengatur tumbuh Atonik yang ditambah insektisida Cruiser, kemudian inkubasi selama 24 jam berikutnya. Bibit dipelihara selama sekitar 14 hari sebelum dipindahkan ke lapangan.

Lahan diolah dengan pengolahan tanah maksimum. Petak percobaan berukuran sekitar 4 m × 5 m, dengan jarak antar blok 75 cm dan jarak antar unit percobaan 50 cm. Bibit ditanam dengan jarak 25 cm × 25 cm, satu tanaman per lubang. Pemupukan terdiri atas Phonska sebanyak 5 g m^{-2} pada persemaian, Phonska sebanyak 300 kg ha^{-1} sebagai pupuk dasar pada 7 hari setelah tanam, dan urea sebanyak 100 kg ha^{-1} yang diberikan dua kali, yaitu pada 21 dan 55 hari setelah tanam. Pengendalian gulma, hama, dan penyakit mengikuti protokol lapangan. Pengairan disesuaikan dengan kondisi lapangan dan dihentikan sekitar 10 hari sebelum panen.

Sebanyak sepuluh tanaman diambil secara acak dari setiap unit percobaan. Karakter yang

diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah anakan total, jumlah anakan produktif, umur berbunga, umur panen, panjang malai, sudut daun, jumlah gabah per malai, jumlah gabah berisi per malai, bobot gabah per rumpun, dan bobot 100 butir. Analisis ragam (ANOVA) digunakan untuk menguji pengaruh genotipe pada α=0,05. uji Tukey digunakan ketika terdapat perbedaan yang nyata dengan taraf nyata yang sama.

Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa entri M6 berbeda nyata untuk beberapa karakter perkembangan dan komponen hasil, sedangkan tinggi tanaman, panjang malai, dan umur panen relatif stabil antargenotipe.

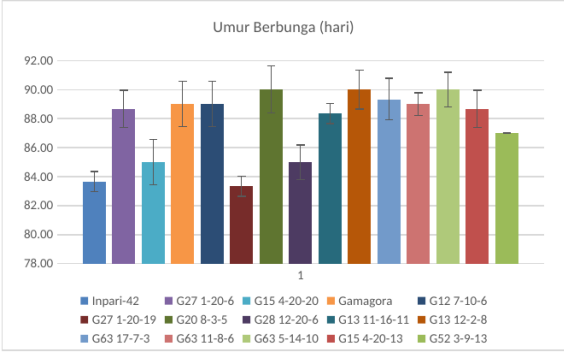
Tabel 1. Ringkasan pengaruh genotipe berdasarkan ANOVA

Karakter	Nilai P	Keputusan (α=0,05)
Tinggi tanaman	0.349	Tidak nyata
Jumlah anakan total	0.039	Nyata
Jumlah anakan produktif	0.002	Nyata
Panjang malai	0.246	Tidak nyata
Sudut daun	0.006	Nyata
Umur berbunga	0.027	Nyata
Umur panen	0.785	Tidak nyata
Jumlah gabah total per malai	<0.001	Nyata
Jumlah gabah berisi per malai	0.005	Nyata
Bobot 100 butir	<0.001	Nyata

Catatan: NS = tidak nyata. Nilai diperoleh dari hasil ANOVA yang disajikan dalam laporan penelitian.

Hasil analisis menunjukkan bahwa entri M6 berbeda nyata untuk beberapa karakter perkembangan dan komponen hasil, sedangkan tinggi tanaman, panjang malai, dan umur panen relatif stabil antargenotipe. Pola keseluruhan tersebut menunjukkan bahwa galur mutan generasi lanjut masih mempertahankan keragaman genetik yang bermanfaat meskipun dievaluasi pada lingkungan lahan kering yang sama.

Pengaruh genotipe nyata terhadap jumlah anakan total (P=0,039), jumlah anakan produktif (P=0,002), sudut daun (P=0,006), umur berbunga (P=0,027), jumlah gabah berisi per malai (P=0,005), jumlah gabah total per malai (P<0,001), dan bobot 100 butir (P<0,001). Sebaliknya, tinggi tanaman (P=0,349), panjang malai (P=0,246), dan umur panen (P=0,785) tidak menunjukkan perbedaan yang nyata. Respons nyata pada karakter reproduktif sangat relevan karena adaptasi terhadap kekeringan pada padi tidak hanya bergantung pada kemampuan bertahan hidup secara vegetatif, tetapi juga pada kemampuan mempertahankan perkembangan reproduktif dan pengisian gabah pada kondisi ketersediaan air terbatas.

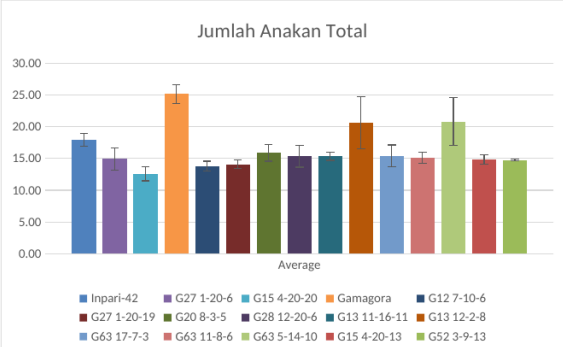


Gambar 1. Umur berbunga 15 entri padi beras merah M6 (gambar asli dari laporan penelitian).

Umur berbunga bervariasi antara 83 hingga 90 hari pada entri yang dievaluasi. G27 1-20-19 merupakan genotipe dengan umur berbunga paling awal (83 hari), diikuti oleh Inpari-42 (84 hari) serta G15 4-20-20 dan G28 12-20-6 (85 hari). Pembungaan yang lebih awal dapat menguntungkan pada kondisi kekeringan terminal karena memungkinkan genotipe menyelesaikan tahap reproduktif yang sensitif sebelum kelembapan tanah menurun secara parah. Namun, umur berbunga yang lebih awal tidak boleh ditafsirkan sebagai toleransi terhadap kekeringan dengan sendirinya; karakter tersebut merupakan salah satu komponen mekanisme pelolosan dari kekeringan yang perlu dievaluasi bersama dengan pengisian gabah dan kestabilan hasil (Blum, 2011; Farooq et al., 2009).

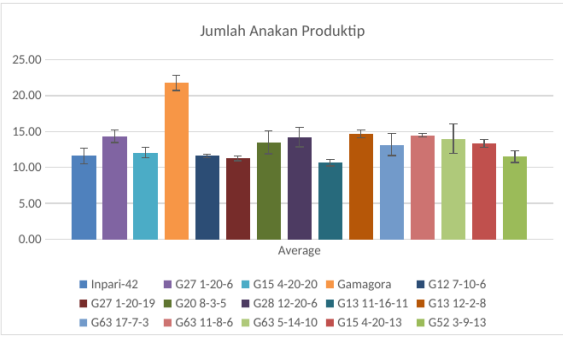
Jumlah anakan total juga berbeda antar entri (P=0,039). Gamagora menunjukkan rataan deskriptif jumlah anakan total tertinggi, sedangkan beberapa galur mutan memiliki nilai yang mendekati varietas pembanding. Pada kondisi lahan kering, jumlah anakan total bermanfaat sebagai karakter seleksi awal, tetapi jumlah anakan produktif lebih berkaitan

langsung dengan pembentukan malai sehingga perlu mendapat bobot yang lebih besar dalam seleksi.



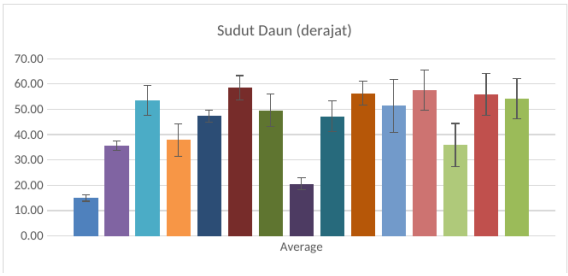
Gambar 2. Jumlah anakan total 15 entri padi beras merah M6 (gambar asli dari laporan penelitian).

Jumlah anakan produktif berbeda nyata antar entri (P=0,002). Gamagora memiliki rataan deskriptif tertinggi (21,78), sedangkan G13 11-16-11 memiliki nilai terendah (10,67). Di antara galur mutan, G13 12-2-8 (14,67), G63 11-8-6 (14,47), G27 1-20-6 (14,33), dan G28 12-20-6 (14,22) menunjukkan nilai yang relatif tinggi. Anakan produktif penting karena berkembang menjadi malai dan berkontribusi langsung terhadap produksi gabah. Namun, pada kondisi lahan kering, pembentukan anakan yang berlebihan dapat meningkatkan persaingan terhadap air dan hara; oleh karena itu, jumlah anakan produktif perlu dievaluasi bersama jumlah gabah berisi dan bobot gabah. G27 1-20-6 sangat menonjol karena jumlah anakan produktifnya yang relatif tinggi disertai 139,1 gabah berisi per malai.



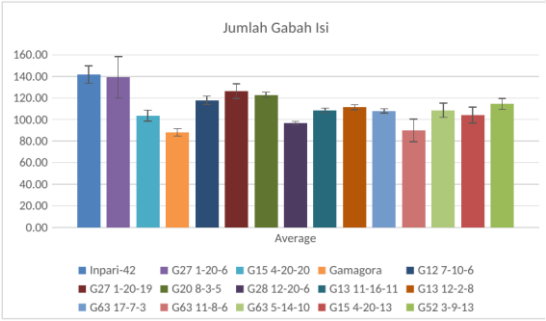
Gambar 3. Jumlah anakan produktif 15 entri padi beras merah M6 (gambar asli dari laporan penelitian).

Sudut daun berbeda nyata antar entri. Rataan deskriptif berkisar antara 14,9° pada Inpari-42 hingga 58,4° pada G27 1-20-19. G63 11-8-6 (57,6°), G13 12-2-8 (56,4°), dan G15 4-20-13 (55,9°) juga menunjukkan nilai yang tinggi. Keragaman sudut daun menunjukkan adanya perbedaan arsitektur tajuk. Daun yang lebih tegak dapat meningkatkan distribusi cahaya di dalam tajuk dan sering dikaitkan dengan pendekatan pemuliaan berbasis ideotipe (Peng et al., 2008). Namun, dalam penelitian ini, sudut daun perlu dipandang sebagai karakter pendukung, bukan sebagai indikator langsung toleransi terhadap kekeringan, karena suhu tajuk, transpirasi, dan efisiensi penggunaan air tidak dikuantifikasi.



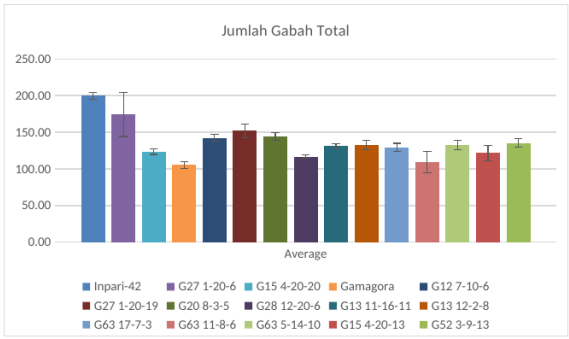
Gambar 4. Sudut daun 15 entri padi beras merah M6 (gambar asli dari laporan penelitian)

Jumlah gabah berisi per malai menunjukkan variasi yang nyata antar entri (P=0,005). Inpari-42 memiliki rataan deskriptif tertinggi (141,7 gabah berisi per malai), diikuti oleh G27 1-20-6 (139,1) dan G27 1-20-19 (126,4); G20 8-3-5 juga menunjukkan nilai yang relatif tinggi (122,9). Nilai terendah terdapat pada Gamagora (88,1) dan G63 11-8-6 (89,8). Jumlah gabah berisi lebih berkaitan langsung dengan hasil yang dapat dipanen dibandingkan jumlah gabah total karena mencerminkan keberhasilan reproduksi dan pengisian gabah. Keterbatasan air selama fase reproduktif dapat menurunkan pembuahan, pasokan asimilat, dan pengisian gabah sehingga meningkatkan kehampaan. Nilai relatif tinggi pada G27 1-20-6 dan G27 1-20-19 menjadikannya kandidat yang perlu diuji lebih lanjut, tetapi kinerjanya harus dikonfirmasi lintas musim, lokasi, dan rezim ketersediaan air yang terdefinisi.



Gambar 5. Jumlah gabah berisi per malai 15 entri padi beras merah M6 (gambar asli dari laporan penelitian).

Jumlah gabah total per malai juga berbeda nyata, dengan rataan deskriptif tertinggi pada Inpari-42 (199,9) dan G27 1-20-6 (174,4). G27 1-20-19 memiliki 152,0 gabah total per malai, sedangkan Gamagora memiliki 105,3. Perbedaan antara jumlah gabah total dan jumlah gabah berisi penting diperhatikan: jumlah gabah total yang tinggi tidak selalu menghasilkan produktivitas yang tinggi apabila pengisian gabah rendah. Oleh karena itu, seleksi sebaiknya lebih menekankan proporsi dan kestabilan gabah berisi daripada hanya produksi spikelet total.



Gambar 6. Jumlah gabah total per malai 15 entri padi beras merah M6 (gambar asli dari laporan penelitian).

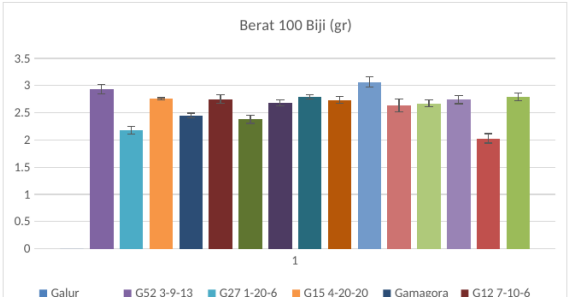
Tabel 2. Rataan deskriptif karakter terpilih pada entri yang menjanjikan

Genotipe	Berbunga (hari)	Anakanpro duktif	Sudut daun (°)	Gabah berisi	Bobot 100butir (g)
Inpari-42	84	11,6	14,9	141,7	2,03
G27 1-20-6	89	14,33	35,7	139,1	2,18
G27 1-20-19	83	11,25	58,4	126,4	2,38
G13 12-2-8	90	14,67	56,4	111,3	3,07
G63 11-8-6	89	14,47	57,6	89,8	2,67
G28 12-20-6	85	14,22	20,6	96,7	2,8

Catatan: Entri ditampilkan secara deskriptif untuk menonjolkan kombinasi karakter; tabel ini bukan pengganti pembandingan rataan pascauji secara lengkap.

Bobot 100 butir berbeda nyata antar entri. G13 12-2-8 memiliki rataan deskriptif tertinggi (3,07 g), diikuti oleh G52 3-9-13 (2,93 g), sedangkan Inpari-42 memiliki nilai terendah (2,03 g). Bobot gabah umumnya lebih stabil dibandingkan karakter seperti jumlah anakan, tetapi tetap dipengaruhi oleh genotipe dan kondisi yang dialami selama pengisian gabah. Oleh karena itu, keragaman yang diamati memberikan peluang seleksi tambahan dalam populasi M6.

Tinggi tanaman, panjang malai, dan umur panen tidak berbeda nyata. Tidak adanya variasi yang nyata pada tinggi tanaman menunjukkan bahwa populasi mutan generasi lanjut relatif seragam untuk karakter vegetatif tersebut pada lingkungan pengujian. Interpretasi yang sama berlaku untuk panjang malai. Karakter-karakter tersebut mungkin mengalami pengaruh lingkungan yang relatif kuat sehingga ekspresi perbedaan genotipe menjadi lebih kecil. Pertimbangan mengenai interaksi genotipe × lingkungan yang serupa telah dilaporkan pada karakter kuantitatif padi yang dievaluasi pada kondisi keterbatasan air (Fageria, 2007; Mustikarini et al., 2018).



Gambar 7. Bobot 100 butir 15 entri padi beras merah M6 (gambar asli dari laporan penelitian).

Secara keseluruhan, karakter-karakter tersebut memberikan dasar seleksi yang lebih bermanfaat apabila dipertimbangkan secara bersama-sama daripada menggunakan satu ukuran saja. G27 1-20-19 merupakan genotipe dengan umur berbunga paling awal dan pada saat yang sama memiliki jumlah gabah berisi serta nilai sudut daun yang relatif tinggi. G27 1-20-6 mengombinasikan jumlah gabah berisi dan gabah total yang relatif tinggi dengan jumlah anakan produktif di atas rata-rata. G13 12-2-8 menonjol dalam bobot 100 butir yang tinggi dan jumlah anakan produktif yang relatif tinggi, meskipun umur berbunganya lebih lambat. Dengan demikian, genotipe-genotipe tersebut dapat dipertimbangkan sebagai kandidat untuk seleksi selanjutnya, tetapi keunggulannya belum dapat dinyatakan sebagai toleransi kekeringan yang stabil tanpa pengujian berulang lintas musim, lokasi, dan rezim ketersediaan air yang terdefinisi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan bukti yang lebih luas bahwa induksi mutasi dapat menghasilkan keragaman kuantitatif yang bermanfaat untuk perbaikan padi (Ahloowalia et al., 2004; Sudharmawan et al., 2022). Hasil tersebut juga mendukung perlunya mengintegrasikan skrining agronomis dengan pengukuran fisiologis. Penelitian terbaru pada padi beras merah mutan menunjukkan bahwa respons terhadap kekeringan dapat melibatkan perubahan klorofil, anatomi akar dan daun, akumulasi prolin, serta kestabilan komponen hasil (Chandraningsih et al., 2024; Raihanun et al., 2024; Sudharmawan et al., 2026a). Oleh karena itu, tahap pemuliaan berikutnya sebaiknya menggabungkan kinerja lapangan dengan karakterisasi fisiologis dan molekuler untuk membedakan adaptasi kekeringan yang sesungguhnya dari kinerja yang menguntungkan pada satu lingkungan tertentu.

Kesimpulan

Populasi padi beras merah M6 hasil iradiasi gamma yang dievaluasi pada kondisi lahan kering menunjukkan keragaman genetik yang nyata untuk beberapa karakter penting secara agronomis, terutama pembentukan anakan, umur berbunga, sudut daun, jumlah gabah berisi dan gabah total per malai, serta bobot 100 butir. Tinggi tanaman, panjang malai, dan umur panen relatif stabil. G27 1-20-19 menunjukkan umur berbunga paling awal dan kombinasi karakter reproduktif yang menguntungkan, sedangkan G27 1-20-6 menunjukkan jumlah gabah berisi dan gabah total yang tinggi. G13 12-2-8 menonjol dalam bobot 100 butir yang tinggi. Genotipe-genotipe tersebut merupakan bahan yang menjanjikan untuk evaluasi pemuliaan lebih lanjut, tetapi skrining lapangan yang dilakukan saat ini belum cukup untuk menetapkan toleransi terhadap kekeringan. Uji multilokasi dan multimusim pada rezim ketersediaan air yang terkarakterisasi, disertai pengukuran fisiologis dan molekuler, diperlukan sebelum memilih galur lanjut untuk pengembangan M7 atau pelepasan varietas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM), Universitas Mataram, atas dukungan terhadap penelitian ini melalui skema pendanaan penelitian PNBP Universitas Mataram Nomor: 3103/UNN18.L1/PP/2025. Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

Referensi

Ahloowalia, B. S., Maluszynski, M., & Nichterlein, K. (2004). Global impact of mutation-derived varieties. *Euphytica,* 135, 187–204.

Blum, A. (2011). Plant breeding for water-limited environments. Springer.

Boy, R., Dewa, D. I., Putra, E. T. S., & Kurniasih, B. (2022). Tanggapan fisiologis dan hasil empat kultivar padi gogo lokal Sulawesi Tengah terhadap cekaman kekeringan. *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia,* 24(2), 132–144. https://doi.org/10.31186/jipi.24.2.132-144

Chandraningsih, R. A., Fauzi, M. T., Suwardji, & Sudharmawan, A. A. K. (2023). Morphological appearance of M3 generation mutant strains of brown rice (G16) to support rice seeding in upland. *Jurnal Biologi Tropis*, 23(2), 76–80. https://doi.org/10.29303/jbt.v23i2.5329

Chandraningsih, R. A., Sudharmawan, A. A. K., Suliartini, N. W. S., Fauzi, M. T., & Yakop, U. M. (2024). Anatomical and physiological responses of M5 mutant red rice G16 from gamma irradiation to drought stress condition in vegetative phase. *Journal of Science and Science Education,* 5(2), 121–128. https://doi.org/10.29303/jossed.v5i2.9082

Chaniago, N., Rammadhan, H. F., & Gunawan, I. (2022). Response of local upland rice from Deli Serdang North Sumatra to water stress conditions. *Sains Agro,* 7(2), 151–164. https://doi.org/10.36355/jsa.v7i2.899

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress. *Agronomy for Sustainable Development,* 29, 185–212.

Fageria, N. K. (2007). Yield physiology of rice. Journal of Plant Nutrition, 30, 843–879.

Ghorbanzadeh, Z., Hamid, R., Jacob, F., Zeinalabedini, M., Salekdeh, G. H., & Ghaffari, M. R. (2023). Comparative metabolomics of root-tips reveals distinct metabolic pathways conferring drought tolerance in contrasting genotypes of rice. *BMC Genomics,* 24, 152. https://doi.org/10.1186/s12864-023-09246-z

Hanifah, W. N., Parjanto, Hartati, S., & Yunus, A. (2020). The performances of M4 generation of Mentik Susu rice mutants irradiated with gamma-ray. *Biodiversitas*, 21(9), 4041–4046. https://doi.org/10.13057/biodiv/d210915

Hikmat, M., Hati, D. P., Pratamaningsih, & Sukarman, M. M. (2022). Kajian lahan kering berproduktivitas tinggi di Nusa Tenggara untuk pengembangan pertanian. Jurnal Sumberdaya Lahan, 16(2), 119–133. https://doi.org/10.21082/jsdl.v16n2.2022.119-133

Ilyani, D. S., Suliansyah, I., & Dwipa, I. (2017). Pengujian resistensi kekeringan terhadap beberapa genotipe padi beras merah (Oryza sativa L.) lokal Sumatera Barat pada fase vegetatif. *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Andalas*, 1(1), 6–14. https://doi.org/10.25077/jagur.1.1.6-14.2017

Kharkwal, M. C., & Shu, Q. Y. (2009). The role of induced mutations in world food security. *Plant Mutation Reports*, 2, 1–10.

Lisar, S. Y. S., & Agdam, H. B. (2020). Agronomic crop responses and tolerance to drought stress. *In Agronomic Crops* (pp. 63–91). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0025-1_5

Mudhor, M. A., Dewanti, P., Handoyo, T., & Ratnasari, T. (2022). Pengaruh cekaman kekeringan terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman padi hitam varietas Jeliteng. *Jurnal Agrikultura*, 33(3), 247–256. https://doi.org/10.24198/agrikultura.v33i3

Mustikarini, E. D., Ardiarini, N. R., Basuki, N., & Kuswanto. (2018). Strategi seleksi toleransi kekeringan pada galur mutan beras merah. *Jurnal Agrivita Ilmu Pertanian,* 39(1), 91–99. https://doi.org/10.17503/agrivita.v39i1.648

Peng, S., Khush, G. S., Virk, P., Tang, Q., & Zou, Y. (2008). Progress in ideotype breeding. Field Crops Research, 108, 32–38.

Puspitaningrum, H., & Salamah, A. (2023). Analisis karakteristik vegetatif dari empat varietas padi dalam perlakuan cekaman kekeringan. *Ilmu-Ilmu Hayati*, 22(1), 11–21. https://doi.org/10.55981/beritabiologi.2023.797

Putri, A. E., Ernawiati, E., Priyambodo, Agustrina, R., & Chrisnawati, L. (2022). Klorofil sebagai indikator tingkat toleransi kekeringan kecambah padi gogo varietas lokal Lampung, Lumbung Sewu Cantik. *Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 7(2), 142–150. https://doi.org/10.24002/biota.v7i2.5150

Raihanun, S., Sudharmawan, A. A. K., Kisman, K., Wangiyana, W., & Yakop, U. M. (2024). Evaluation of some drought tolerant M5 rice genotypes on proline content and yield components at different levels of field capacity. *Journal of Science and Science Education,* 5(2), 113–120. https://doi.org/10.29303/jossed.v5i2.9008

Sakamoto, T., & Matsuoka, M. (2008). Identifying and exploiting grain yield genes in rice. *Current Opinion in Plant Biology*, 11, 209–214.

Sudharmawan, A. A. K., Aryana, I. G. P. M., Suliartini, N. W. S., & Chandraningsih, R. A. (2022). Mutant character of the M3 generation of red rice (G16) results by gamma ray irradiation 300 Gy. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA,* 8(6), 2888–2893. https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i6.2486

Sudharmawan, A. A. K., Aryana, I. G. P. M., Farid Hemon., & A., Suliartini, N. W. S. (2026a). Morphological Variation and Yield-Determining Panicle Traits in M4 Red Rice (Oryza sativa L) Mutan Lines Derived from 200 Gy Gamma Irradiation. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. Vol. 21, No. 3, March, 2026, pp. 695-704. https://doi.org/10.18280/ijdne.210308

Sudharmawan, A. A. K., Aryana, I. G. P. M., Wangiyana Wayan., & Raihanun Siti. (2026b). Drought tolerance and yield stability of M5-G16 red rice mutants:A morpho-physiological and Eberhart–Russell analysis. *Jourrnal of Water and Land Development* doi: 10.24425/jwld.2026.157843

Suliartini, N. W. S., Aryana, I. G. P. M., Sudharmawan, A. A. K., & Sudika, I. W. (2022). Kandidat galur unggul mutan padi G16 hasil induksi mutasi dengan sinar gamma. *Sains Teknologi & Lingkungan*, 8(1), 66–72. https://doi.org/10.29303/jstl.v8i1.293

Tumanggor, G. E., Iswahyudi, & Ainul, W. (2022). Pertumbuhan, produksi dan karakter genetik padi kultivar Sileso generasi M-2 hasil iradiasi sinar gamma. *Agrosamudra,* 9(2), 31–40. https://doi.org/10.33059/jupas.v9i2.6519