JIUBJ Jurnal Ilmiah
Universitas Batanghari Jambi
Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi 23, 1 (2023): 910-920
DOI: 10.33087/jiubj.v23i1.3017
http://ji.unbari.ac.id/index.php/ilmiah

Kajian: Pengembangan Varietas Unggul Baru Padi (Oryza sativa L.) Lokal melalui Iridasi Gamma

Henny Puspita Sari, Irfan Suliansyah, Aswaldi Anwar, Indra Dwipa
Program Doktoral Ilmu Pertanian, Universitas Andalas, Sumatera Barat
Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas
Correspondence email: hennypuspitasari@unespadang.ac.id

Abstrak. Kemampuan mutagenesis secara luas dapat memperbaiki genetik tanaman, termasuk fakta bahwa varietas baru dapat dikembangkan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan metode pemuliaan konvensional dan transgenesis, yang lebih sulit untuk dievaluasi ulang. Cahaya dari sumber sinar gamma adalah mutagen fisik yang banyak digunakan dalam teknik mutagenesis yang aman dan efektif untuk kesehatan manusia karena tidak ada risiko lingkungan yang terkait dengan generasi varian yang dapat diinduksi. Metoda yang digunakan dalam makalah ini dengan mengelompokkan artikel menurut relevansinya dengan subjek dan tahun penelitian, dan terakhir mengelola struktur penjelasan. Artikel jurnal mencakup periode 2012 hingga 2022 dicari menggunakan kata kunci: pemuliaan, mutasi, mutagen, padi, dan iridasi gamma. Seleksi artikel dipilih berasal dari web PubMed, Elsevier, dan springer. Karya ini mengintegrasikan informasi yang tersedia tentang efek mutasi pemuliaan pada spesies tanaman di negara yang berbeda, dan menyoroti potensi iradiasi gamma sebagai pendekatan yang fleksibel dan praktis dan dapat diterapkan pada tanaman padi (Oryza sativa L.), dengan metode seleksi yang tepat.

Kata kunci: genetik; induksi; iridasi gamma; mutangen; padi.

Abstract. *The widespread use of mutagenesis for plant genetic improvement can be explained by a number of factors, including the fact that new varieties can be developed in a shorter time than conventional breeding methods and that transgenesis is more difficult to re-engineer. Gamma rays are physical mutagens that are often used in plant mutagenesis techniques and are safe for human health because there is no environmental risk in the induced generations. The method used in this paper is by grouping articles according to their relevance to the subject and year of research, and finally managing the explanatory structure. Journal articles for the period 2012 to 2022 were searched using keywords: breeding, mutation, mutagen, rice, and gamma iridation. The selection of selected articles comes from the PubMed, Elsevier, and Springer web sites. This paper integrates the available data on the effects of mutation breeding of plant varieties in different countries and addresses the potential of gamma irrigation as a flexible and practical approach that can be applied to rice crops and an appropriate selection method.*

Keywords**:** *genetics; induction; gamma irradiation; mutagens; rice.*

PENDAHULUAN

Pengetahuan tentang keragaman genetik dan struktur populasi koleksi plasma nutfah merupakan landasan penting untuk perbaikan tanaman. Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan sistem transmisi informasi genetik yang penting dari keanekaragaman hayati pertanian dan sumber daya untuk meningkatkan hasil dan kualitas (Q. Y. Lei *et al.*, 2021; Nachimuthu *et al.*, 2015). Bukan hanya bahan dasar dan sumber gen pemuliaan padi dan perbaikan genetik, tetapi juga kriteria dalam membudidayakan ras padi baru yang berkualitas tinggi serta mampu beradaptasi. Untuk mengidentifikasi dan membedakan antara kultivar secara efektif, perlu untuk menggambarkan serta mengevaluasi karakteristik morfologis dari sumber plasma nutfah yang tersedia secara grafis (Ahmed *et al.*, 2016; Kumbhar *et al.*, 2015). Sangat penting bahwa genotip unggul tersedia untuk pengembangan kultivar elit (Hidayatun *et al.*, 2022). Ada tiga faktor yang menentukan keberhasilan plasma nutfah padi: jumlah keseluruhan malai, jumlah rata-rata benih per malai, dan berat benih individu (R. Li *et al.*, 2019).

Pengumpulan, penilaian, dan perlindungan keanekaragaman sumber daya plasma nutfah padi membentuk landasan penting bagi pertanian berkelanjutan dan keamanan

pangan. Sumatera Barat memiliki sumber daya plasma nutfah padi yang melimpah dan berharga. Namun, penilaian mendalam tentang keragaman genetik plasma nutfah padi di setiap daerah dan studi yang berkaitan dengan perlindungan padi lokal belum terkelola secara baik. Tujuan utama mempelajari keragaman genetik dan identifikasi sifat berharga tertentu, (Hase *et al.,* 2020) dengan mengeksplorasi keragaman genetik dalam populasi dan antar populasi (Weerakoon & Somaratne, 2021).

Penggunaan mutagenesis secara luas untuk perbaikan genetik tanaman dapat dijelaskan oleh sejumlah faktor, termasuk fakta bahwa varietas baru dapat dikembangkan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan metode pemuliaan konvensional dan transgenesis (Patel *et al.,* 2015; Maghuly *et al.,* 2017; ; Masoabi et al., 2018; Miri, 2018; Chepkoech *et al.,* 2020; Abdelnour-Esquivel et al., 2020; Njoroge *et al.,* 2022). Sinar gamma merupakan mutagen fisik yang sering digunakan dalam teknik mutagenesis tanaman (Sathesh-Prabu dan Lee, 2016) dan aman bagi kesehatan manusia karena tidak ada risiko lingkungan dalam generasi varietas yang diinduksi (Çelik dan Atak, 2017). Penelitian Suliansyah, (2020) menunjukkan bahwa penggunaan teknologi gamma-ray selama perkembangan embrio dapat mengakibatkan mutasi dan meningkatkan variabilitas genetik. Pergeseran psikologis positif yang ditularkan dari satu generasi ke generasi berikutnya (Viana *et al.,* 2019). Mutasi yang diharapkan dapat menyebabkan tekanan selektif pada sifat yang dipilih, memungkinkan pemilihan sifat dengan kualitas yang lebih baik, sementara sifat yang diinginkan dari galur asli dipertahankan. Tujuan dari artikel ini adalah untuk mengetahui respon tanaman padi melalui iridasi gamma.

METODE

Pengumpulan literature review, diperlukan beberapa langkah, seperti mencari artikel berdasarkan judul subjek yang luas, mengelompokkan artikel menurut relevansinya dengan subjek dan tahun penelitian, dan terakhir mengelola struktur penjelasan dan membandingkan data terkait dengan menggunakan *publish or perish*. Artikel jurnal mencakup periode 2012 hingga 2022 dicari menggunakan kata kunci: pemuliaan, mutasi, mutagen, padi, dan iridasi gamma, dengan artikel yang paling relevan dan paling erat hubungannya dengan topik penelitian yang sedang diidentifikasi. Seleksi artikel yang dipilih berasal dari web PubMed, Elsevier, dan springer sebanyak 65 artikel dari 200 artikel. Untuk mendapatkan gap penelitian dari artikel yang diidentifikasi, penulis menggunakan analisis bibliometric dengan aplikasi Vosviewer.

HASIL

Eksplorasi dan Karekteristik Morfologi

Sifat morfologi dalam studi keanekaragaman genetik dapat secara langsung memberikan informasi tentang kekayaan plasma nutfah dan informasi penting bagi pemulia terutama ketika populasi sumber daya sangat besar, ini merupakan metode klasik yang terus digunakan secara ekstensif dalam evaluasi sumber daya plasma nutfah (Q. Lei *et al.,* 2018). Untuk manipulasi genetik yang tepat dari sifat kuantitatif kompleks seperti, hasil, toleransi terhadap cekaman biotik/abiotik, kualitas, dan pemahaman dasar genetik/molekul dari sifat target perlu diselidiki secara menyeluruh. Karakteristik morfologi di amati melalui pengamatan kuantitatif dan kuantitatif sesuai panduan *International Rice Research Institute* (IRRI)(Bioversity International *et al.,* 2007). Analisis keanekaragaman bergantung pada informasi genotip, fenotipik, dan geografis suatu spesies tanaman. Analisis koefisien korelasi memberikan pengetahuan yang berguna dalam hal karakteristik kuantitatif dan kualitatif yang mengeluarkan kredibilitas dan atribut penting tentang suatu spesies (M. Z. Islam *et al.,* 2018). Rasio elongasi linier dan rasio ekspansi lebarnya dihitung menurut metode standar (Andrew-Peter-Leon *et al.,* 2021). Menurut Mehmood *et al.,* (2021) pada karakteristik morfologi, *Principal Component Analysis* (PCA) merupakan alat yang sangat baik untuk menilai sifat-sifat yang berbeda untuk menilai pengaruh independen dari suatu sifat tertentu pada variasi total dalam ekspresi sifat itu.

Karakteristik Molekuler (DNA)

Karakter morfologi dan fisiologis telah lama digunakan untuk mengevaluasi keragaman genetik tanaman, untuk menunjukkan hubungan antara divergensi genetik dan geografis dan mengeksplorasi peran kuantitatif menuju divergensi maksimal (M. Z. Islam *et al.,* 2018). Mengingat dampak faktor lingkungan, penilaian hanya berdasarkan fenotipe tanaman bukanlah indikator yang dapat dipercaya dari perbedaan genetik. Teknologi penanda molekuler berbasis PCR modern telah menyediakan teknik yang

sangat efektif untuk menilai hubungan evolusioner di seluruh populasi, variasi, dan spesies tanaman. (Chitwood *et al.*, 2016). Penanda molekuler telah terbukti menjadi alat yang efektif untuk mengevaluasi keragaman genetik dan menjelaskan hubungan antara genetik dalam genotype (Mehmood *et al.*, 2021). Ada banyak penanda molekuler yang tersedia untuk digunakan dalam menilai variasi dan keragaman genetik, termasuk RFLP, RAPD, SSRs, ISSRs, AFLP, retrotransposon, dan SNPs (Ashry *et al.*, 2018; Ghonaim *et al.*, 2021).

Simple sequence repeat (SSR) merupakan penanda yang memiliki keunggulan dibandingkan penanda molekuler lainnya. Karena reproduktifitas yang sangat baik, kesederhanaan, kemampuan penilaian yang mudah, sifat multi-alel, hiper-variabilitas, pewarisan ko-dominan, dan cakupan genom yang luas, sehingga dapat digunakan untuk menilai keragaman genetik suatu organisme secara efisien dan murah (Ashry *et al.*, 2018; Ghonaim *et al.*, 2021; M. M. Islam *et al.*, 2020; Mehmood *et al.*, 2021; Muto *et al.*, 2019; Weerakoon & Somaratne, 2021).

Tabel 1
Karekteristik Morfologi dan Molekuler Padi

Referensi	Metoda		Pengamatan	Hasil
	Morfologi	Molekuler		
Mehmood *et al.*, (2021)/ Pakistan	*IRRI, Principal Component Analysis* (PCA)	*Simple Sequence Repeat* (SSR) metode PCR	kuantitatif dan kualitatif (tinggi tanaman, umur panen, panjang malai, faktor kesuburan, bobot 1000 butir, dan kandungan mineral biji)	8 genotipe padi eksotik dan 7 genotipe padi lokal menunjukkan keragaman yang nyata
(Weerakoon & Somaratne, 2021)/ Sri Lankan	*Characterization Catalogue on Rice Germplasm* (PGRC) menggunakan Statistik deskriptif dan analisis statistik inferensial	*Simple Sequence Repeat* (SSR) metode PCR	Kualitatif (warna lemma palea, warna bulu pada saat masak, tinggi semai, dan sudut daun bendera)	100 genotip menjadi 7 kelompok fenotip
(Muto *et al.*, 2019)/Laos	-	*Simple Sequence Repeat* (SSR)/ metode Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB)	-	314 aksesi menjadi 3 cluster
(Q. Lei *et al.*, 2018)/Cina	Metode terpadu komprehensif etnobotani, antropologi budaya, morfologi tumbuhan (kualittatif dan kuantitatif)	-	Kualitatif dan kuantitaif (Panjang malai, nomor biji-bijian, berat 1000 butir, kualitas awn, Panjang tenda, Warna tenda, Bentuk biji-bijian, Warna sekam, Warna biji-bijian, Warna, endosperma)	368 aksesi sumber plasma nutfah beras ketan wangi (Oryza sativa L.)
M. Z. Islam *et al.*, (2018)/ Bangladesh	*IRRI, Principal Component Analysis* (PCA)	*Simple Sequence Repeat* (SSR) metode PCR	Kualitatif (Penuaan daun, Sudut daun bendera, Jenis malai, Warna apikulus, kandungan aroma, Warna bilah daun, Warna lemma palea, Warna kulit biji, Warna Stigma, Aktivitas malai, Warna pelepah daun)	113 plasma nutfah yang diuji berdasarkan 12 ciri kualitatif fenotipik. Kelompok I, II, III, dan IV masing-masing terdiri dari 33, 45, 21, dan 14 plasma nutfah padi.
Andrew-Peter-Leon et al., (2021)/India	*IRRI*	*Simple Sequence Repeat* (SSR) metode PCR	Kualitatif dan Kuantitatif (tinggi, hari berbunga sampai 50%, jumlah anakan produktif, panjang malai, jumlah gabah isi per	

	malai, berat 100 gabah, panjang kernel, lebar kernel tanpa kulit dalam mm, rasio panjang kernel, panjang beras setelah dimasak, lebar beras setelah dimasak.

Sumber: data olahan

Induksi Mutasi dalam Pemuliaan Tanaman

Untuk memperluas keragaman genetik dapat digunakan beberapa cara, salah satunya melalui pemuliaan mutasi. Pemuliaan mutasi adalah teknik yang dilakukan dengan mengubah genetika untuk menghasilkan kultivar baru dengan variasi genetik yang diciptakan oleh mutagenesis (Shu *et al*., 2012). Variasi genetik merupakan sumber penting dari perbaikan dan adaptasi tanaman, karena menyediakan berbagai alel yang berkontribusi terhadap perkembangan sifat-sifat baru untuk pemuliaan tanaman. Penerapan teknik mutasi telah menciptakan sejumlah besar variasi genetik, yang berperan penting dalam pemuliaan tanaman, genetika, dan studi genomik lanjutan sejak 1928, teknik mutasi tersebut meliputi mutagen fisik (sinar gamma, sinar-X, ion berat, dan proton), agen kimia (etil metanasulfonat (EMS), N-nitroso-N-metilurea, dan kolkisin), dan bio-teknik (modifikasi genetik, transgenik atau pengeditan gen berdasarkan teknologi CRISPR/Cas9) (Du *et al.*, 2022). Menurut Shu *et al*., (2012) selama 40 tahun terakhir, penggunaan sinar gamma dalam induksi mutasi menjadi sangat lazim, sementara penggunaan sinar-X telah berkurang secara signifikan. Dibandingkan dengan metode pemuliaan lain, seperti persilangan dan mutagenesis kimia, pemuliaan mutasi radiasi memiliki keunggulan yang tidak ada bandingannya, dengan spektrum mutasi yang luas dan efisiensi mutasi yang tinggi (Shirasawa et al., 2016; Ma *et al.*, 2021). Secara komparatif, mutagenesis radiasi gamma memiliki karakteristik mutasi genetik yang lebih kompleks dan fenotipe mutan yang lebih menguntungkan (Ma *et al.,* 2021), menghasilkan variasi genetik yang luas (spektrum mutasi), yang memungkinkan untuk memilih sumber daya mutan yang memiliki sifat target dari populasi mutan (Chun *et al.,* 2012; El Oualkadi *et al.,* 2019)**.**

Penerapan Radiasi Gamma pada Tanaman Padi

Respon tanaman terhadap pengaruh iradiasi sinar gamma selain dipengaruhi oleh jenis kultur yang digunakan juga bergantung pada tingkat dosis iradiasi yang digunakan (Zanzibar & J. Sudrajat, 2016). Laju dosis iradiasi adalah jumlah dosis yang diserap per satuan waktu (rad per detik atau Gray per detik) (Abdelnour-Esquivel *et al.,* 2020). Dosis tinggi umumnya mengakibatkan kematian, sedangkan dosis rendah umumnya hanya menyebabkan perubahan fenotipe tanaman yang tidak normal dan bersifat reversible (Abdelnour-Esquivel *et al.,* 2020; Gajbar *et al.,* 2021; Hasan *et al.,* 2020; Kant & Chakraborty, 2021; Kato *et al.,* 2020; Mohammed *et al.,* 2018; Ocloo *et al.,* 2017). Sensitivitas terhadap radiasi dapat diukur berdasarkan nilai LD (*lethal dose*), yaitu dosis yang menyebabkan kematian populasi tanaman yang diradiasi adalah penentuan LD^{50} (50%) (Njoroge *et al.,* 2022). Radiasi biasanya mempengaruhi dimensi dan massa tanaman. Dalam beberapa dosis bergantung pada konsentrasi radiasi atau cara di mana seluruh dosis difraksinasi. Menurut Katiyar *et al.,* (2022). Sinar gamma salah satu iridasi yang setelah berinteraksi dengan molekul, menghasilkan radikal bebas dan mengubah konstituen penting sel. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menjelaskan pengaruh beragam dosis sinar gamma secara khas dalam morfologi, fisiologi dan biokimia. Perkembangan penelitian penerapan radiasi sinar gamma pada tanaman padi dirangkum dalam Tabel 2.

1. Respons Morfo-fisiologis

   Sejumlah bukti menunjukkan bahwa iradiasi benih dan bagian vegetatif tanaman dengan sinar gamma, dalam kisaran 1–20 Gy mempercepat proses pertumbuhan dan perkembangan (Katiyar *et al.,* 2022). Peningkatan yang dimediasi sinar gamma dalam atribut seperti persentase perkecambahan, panjang tunas akar, jumlah malai, panjang malai, jumlah biji per malai, dan sifat fitokimia telah dijelaskan dalam Harding *et al.,* (2012); *Islam et al.,* (2014);

Warman *et al.*, (2015); Kadhimi *et al.*, (2016); Gowthami *et al., (*2017); Tiwaria *et al.*, (2018); Lalitha *et al.*, (2019); Imam & Chakraborty, (2019); Kato *et al.*, (2020); Andrew-Peter-Leon *et al.*, (2021); Gowthami *et al.*, (2021). Hasil penelitian Andrew-Peter-Leon *et al.*, (2021), generasi M_6 pada populasi mutan manghasilkan hari berbunga lebih cepat (11,81%), menurunkan tinggi tanaman hingga 40%, dan meningkatkan hasil per tanaman sebesar 45,73%. Hernández-Soto *et al.*, (2021) dalam penelitiannya menyatakan bahwa pada dosis 200 Gy diperoleh mutan yang lebih kecil dan lebih produktif dengan hasil biji yang lebih baik, pada kultivar dengan waktu panen yang lama.

Namun, dalam penelitian Islam *et al*., (2014), dilaporkan persentase perkecambahan dan kelangsungan hidup tanaman padi menurun secara bertahap, dengan meningkatnya dosis radiasi gamma. Sangat umum dalam pemuliaan mutasi bahwa dengan peningkatan dosis radiasi, penurunan bertahap dalam perkecambahan dan kelangsungan hidup terjadi pada padi dan tanaman lainnya (Njoroge *et al.*, 2022). Penerapan dosis rendah sinar gamma untuk tanaman mendorong pertumbuhan sinyal dengan menambah kapasitas antioksidan sel atau dengan mengubah jalur sinyal hormon. Menurut Mounir *et al.*, (2022), jaringan tanaman setelah terkena radiasi dosis rendah memperoleh kapasitas untuk memancarkan radiasi biogenik sekunder dan merangsang sel-sel yang tidak aktif untuk membelah mungkin dengan mengaktifkan berbagai reseptor membrane. Dosis sinar gamma yang ditingkatkan diperkirakan berbahaya bagi sel tanaman karena mutasi DNA pada tahap interfase siklus sel, yang mengganggu diferensiasi sel dan menghambat genesis tunas, sehingga respons pertumbuhan terhambat (Smillie et al., 2012).

2. Respon Biokimia

Respon morfologi tanaman terhadap sinar gamma mudah terlihat dan untuk mengimbanginya, berbagai parameter biokimia termasuk kandungan klorofil, protein, asam amino, prolin, pati, dan tingkat ROS dapat diamati. Hal ini selalu terjadi dalam fisiologi dan biokimia tanaman yang selanjutnya mengakibatkan ketidakseimbangan hormonal, penghambatan enzim, dan gangguan pertukaran gas (Mounir *et al.*, 2022). Song *et al*., (2012) menyatakan bahwa mutan padi yang telah diiradiasi dengan sinar gamma mengalami peningkatan antioksidan, asam amino dan klorofil. Hwang *et al*., (2016) melaporkan bahwa ini mengarah ke molekuler yang lebih lanjut, dimana analisis tentang alel baru dibuat untuk mengontrol waktu pembungaan yang disebabkan oleh mutagenesis fisik, dan memanfaatkan pematangan awal untuk berbunga lebih awal. Efek biologis sinar gamma didasarkan pada interaksi dengan atom atau molekul dalam sel, terutama air, untuk menghasilkan radikal bebas (F. Li *et al.*, 2019). Pengaruh iradiasi gamma (5-20 kGy) pada sifat fisikokimia, antioksidan dan termal pati beras merah telah diamati, peningkatan dosis iradiasi dapat menurunkan suhu transisi, entalpi gelatinisasi, pH dan kandungan amilosa pati secara signifikan (Kumar *et al.*, 2017).

3. Dampak sinar gamma pada tanaman stres abiotik

Para peneliti dari waktu ke waktu melaporkan bahwa dosis rendah sinar gamma memperbaiki stres logam berat pada berbagai tanaman, tetapi penjelasan konklusif untuk efek stimulasinya belum ditarik secara empiris (Maghuly *et al.*, 2017; Spencer-Lopes *et al.*, 2018). Para ilmuwan berpendapat bahwa dosis rendah (5-100 Gy) dari iradiasi gamma telah memicu sintesis RNA dan protein pada tahap perkecambahan, serta pada tanaman stres Cd (Kumar *et al.*, 2017; Mounir *et al.*, 2022). Paparan logam berat menyebabkan peningkatan produksi ROS, yang menyebabkan pembengkakan pada tilakoid dan perubahan membran dalam kloroplas karena interaksi dengan kelompok enzim tiol (-SH) (Wang *et al.*, 2017) Modulasi respon fisiologis dan tingkat ekspresi gen yang terkait dengan ketahanan cekaman Pb telah diamati pada bibit *Arabidopsis thaliana* setelah diiradiasi dengan sinar gamma dosis rendah (50 Gy) (Qi *et al.*, 2015). Iradiasi gamma dosis rendah (50 Gy) juga meningkatkan ekspresi gen yang terlibat dalam detoksifikasi logam berat dan biosintesis ABA, dan menurunkan ekspresi gen degradasi ABA (Wang *et al.*, 2017). Qi *et al.*, (2014) mengamati peningkatan kadar mRNA dari gen pensinyalan garam terlalu sensitif dalam sampel stres garam ketika disinari dengan sinar gamma (50 Gy).

Tabel 2
Penerapan Radiasi Gamma pada Tanaman Padi

Referensi	Bahan	Genotipe	Dosis	Mutan	Hasil	Publis
Njoroge et al., (2022)/Ghana	Benih	Basmati 217, Basmati 370, ITA310, dan Komboka	0 - 500 Gy (^{60}Co) pada laju dosis 2,25 KGy/jam	M0-M1	Iradiasi Gamma meningkatkan kelangsungan hidup dan tinggi bibit pada dosis 50, 100, dan 150 Gy,	taylor and francis
Gowthami et al., (2021)	Benih	ADT 37	100 Gy-500 Gy (^{60}Co) (500 biji/dosis) pada laju dosis 24,5 Gy/menit	M0-M4	Induksi tipe bulir pada iridasi 300 Gy	taylor and francis
Archanachai et al., (2021) Thailand	Benih	Khao KDML 105, Khao Pathum Thani 1, Khao Gor Kor 31, Khao Gor Kor 41, dan Khao Gor Kor 57	5, 10, 20, 40, 60, 80, 100-1000 Gy (^{137}Cs)	-	Senyawa bioaktif (senyawa flavonoid dan fenolik) dan potensi antioksidan yang berkaitan dengan peningkatan kesehatan manusia (60-100 Gy)	elsevier
Gajbar et al., (2021)/India	Benih	cv. Mandya Sona	5Gy, 10Gy, 15Gy, 20Gy dan 25Gy (per 250 g benih) dengan laju 5,56; 10,13; 5,71; 20,62 dan 25,53 kGy/menit (^{60}Co)	-	Ketahanan terhadap penyakit blas padi melalui modulasi perubahan histokimia dan biokimia (15-20 Gy)	elsevier
Andrew-Peter-Leon et al., (2021)	Benih	White Ponni	100-500 Gy (^{60}Co)	M0-M6	semi-kerdil dan pematangan awal pada kultivar	PLoS ONE
Kato et al., (2020)/Jepang	Benih	Fukuhibiki, Oonari, Yamadawara, Mochidawara, Akidawara.	250 Gy (^{60}Co)	M1-M7	Produksi lebih tinggi	MDPI
Abdelnour-Esquivel et al., (2020)/ Costa Rica	In Vitro dan Benih	CR-5272	In Vitro: 0, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, dan 500 Gy dan Benih 0, 50, 100, 150, 200, 250, dan 300 Gy	M1-M2	Galur yang toleran terhadap salinitas dan kekeringan (60 Gy untuk In Vitro dan 50 Gy untuk Benih)	springer
Hwang et al., (2020)/Jepang	Benih	japonica cv. Donganbyeo	200 Gy (59 tan) dan 300 Gy (64 tan)	M7	Pengurutan ulang populasi mutan	springer

Sumber: data olahan

SIMPULAN

Di tengah situasi lingkungan yang tidak menguntungkan saat ini, tantangan utama di

sektor pertanian adalah untuk memastikan ketahanan pangan yang ada maupun yang akan datang. Namun, kendala penting dalam upaya ini adalah tekanan lingkungan. Sejumlah mekanisme fisiologis, biokimia dan molekuler berpartisipasi dalam mengembangkan toleransi terhadap berbagai tekanan pada tanaman tanaman. Penelitian yang dilakukan dalam beberapa dekade terakhir telah dengan jelas menunjukkan bahwa dosis rendah iradiasi gamma dapat digunakan sebagai solusi bijaksana untuk mengurangi efek merusak dari tekanan abiotik dan untuk hasil yang lebih baik. Asosiasi antara berbagai mekanisme toleransi yang rumit sangat penting bagi tanaman untuk memerangi faktor stres. Pada tanaman, penerapan radiasi gamma telah diperhatikan untuk meningkatkan penyerapan nutrisi, memodulasi biosintesis, metabolit kunci sekunder dan osmolit, dan mengatur aktivitas metabolisme yang berbeda untuk menimbulkan toleransi terhadap tekanan lingkungan. Manfaat yang dipengaruhi radiasi gamma tidak terbatas pada memberikan toleransi stres, tetapi juga terlihat untuk meningkatkan kinerja tanaman dalam kondisi normal, dengan memanfaatkan mekanisme utama yang sama.

DAFTAR ISI

Abdelnour-Esquivel, A., Perez, J., Rojas, M., Vargas, W., & Gatica-Arias, A. 2020. Use of gamma radiation to induce mutations in rice (Oryza sativa L.) and the selection of lines with tolerance to salinity and drought. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, *56*(1), 88–97. https://doi.org/10.1007/s11627-019-10015-5

Ahmed, M. S., Bashar, M. . ., & Shamsuddin, A. K. M. 2016. Diversity Level, Spearman's Ranking and Core Collections from 98 Rice Germplasm through Quantitative, Qualitative and Molecular Characterizations. *Rice Genomics and Genetics*, *7*(2), 1–10. https://doi.org/10.5376/rgg.2016.07.0002

Andrew-Peter-Leon, M. T., Ramchander, S., Kumar, K. K., Muthamilarasan, M., & Pillai, M. A. 2021. Assessment of efficacy of mutagenesis of gamma-irradiation in plant height and days to maturity through expression analysis in rice. *PLoS ONE*, *16*(1 January), 1–20. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245603

Archanachai, K., Teepoo, S., & Sansenya, S. 2021. Effect of gamma irradiation on growth, proline content, bioactive compound changes, and biological activity of 5 popular Thai rice cultivars. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *132*(4), 372–380.

Ashry, N. A., Ghonaim, M. M., Mohamed, H. I., & Mogazy, A. M. 2018. Physiological and molecular genetic studies on two elicitors for improving the tolerance of six Egyptian soybean cultivars to cotton leaf worm. *Plant Physiology and Biochemistry*, *130*(June), 224–234. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.010

Bioversity International, IRRI, & WARDA. 2007. *Descriptors for wild and cultivated rice (Oryza spp.). Bioversity*. Bioversity International, Rome, Italy; International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines; WARDA, Africa Rice Center, Cotonou, Benin.

Çelik, Ö., & Atak, Ç. 2017. Applications of Ionizing Radiation in Mutation Breeding. *New Insights on Gamma Rays*, *August*. https://doi.org/10.5772/66925

Chitwood, J., Shi, A., Mou, B., Evans, M., Clark, J., Motes, D., Chen, P., & Hensley, D. 2016. Population structure and association analysis of bolting, plant height, and leaf erectness in spinach. *HortScience*, *51*(5), 481–486. https://doi.org/10.21273/hortsci.51.5.481

Chun, J. B., Ha, B. K., Jang, D. S., Song, M., Lee, K. J., Kim, J. B., Kim, S. H., Kang, S. Y., Lee, G. J., Seo, Y. W., & Kim, D. S. 2012. Identification of mutations in OASA1 gene from a gamma-irradiated rice mutant population. *Plant Breeding*, *131*(2), 276–281. https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2011.01933.x

Du, Y., Feng, Z., Wang, J., Jin, W., Wang, Z., Guo, T., Chen, Y., Feng, H., Yu, L., Li, W., & Zhou, L. 2022. Frequency and Spectrum of Mutations Induced by Gamma Rays Revealed by Phenotype Screening and Whole-Genome Re-Sequencing in Arabidopsis thaliana. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(654), 1–22. https://doi.org/10.3390/ijms23020654

El Oualkadi, A., Mouhib, M., & Hajjaj, B. 2019. Study of Radio-Sensitivity of Strawberry Runners cv. Fortuna under Moroccan

Conditions. *American Journal of Plant Sciences*, *10*(10), 1921–1931. https://doi.org/10.4236/ajps.2019.1010135

Gajbar, T. D., Kamble, M., Adhikari, S., Konappa, N., Satapute, P., & Jogaiah, S. 2021. Gamma-irradiated fenugreek extracts mediates resistance to rice blast disease through modulating histochemical and biochemical changes. *Analytical Biochemistry*, *618*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.ab.2021.114121

Ghonaim, M. M., Mohamed, H. I., & Omran, A. A. A. 2021. Evaluation of wheat (Triticum aestivum L.) salt stress tolerance using physiological parameters and retrotransposon-based markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *68*(1), 227–242. https://doi.org/10.1007/s10722-020-00981-w

Gowthami, R., Vanniarajan, C., J. Souframanien, Venib, K., & Renganathan, V. G. 2021. Efficiency of electron beam over gamma rays to induce desirable grain-type mutation in rice (Oryza sativa L.). *International Journal of Radiation Biology*, *97*(5), 727–736. https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1889702

Gowthami, R., Vanniarajan, C., Souframanien, J., & Arumugam Pillai, M. 2017. Comparison of radiosensitivity of two rice (Oryza sativa L.) varieties to gamma rays and electron beam in M1 generation. *Electronic Journal of Plant Breeding*, *8*(3), 732–741. https://doi.org/10.5958/0975-928X.2017.00111.9

Harding, S. S., Johnson, S. D., Taylor, D. R., Dixon, C. A., & Turay, M. Y. 2012. Effect of Gamma Rays on Seed Germination, Seedling Height, Survival Percentage and Tiller Production in Some Rice Varieties Cultivated in Sierra Leone. *American Journal of Experimental Agriculture*, *2*(2), 247–255. https://doi.org/10.9734/ajea/2012/820

Hasan, N. A., Rafii, M. Y., Harun, A. R., Ahmad, F., Jaafar, N. N., Ramachandran, K., & Hussein, S. 2020. Radiosensitivity Response To Acute Gamma Irradiation In A Malaysian Rice Variety, MR284. *Jurnal Sains Nuklear Malaysia*, *32*(2), 1–7.

Hase, Y., Satoh, K., Seito, H., & Oono, Y. 2020. Genetic Consequences of Acute/Chronic Gamma and Carbon Ion Irradiation of Arabidopsis thaliana. *Frontiers in Plant Science*, *11*(336), 1–12. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00336

Hernández-Soto, A., Echeverría-Beirute, F., Abdelnour-Esquivel, A., Valdez-Melara, M., Boch, J., & Gatica-Arias, A. 2021. Rice breeding in the new era: Comparison of useful agronomic traits. *Current Plant Biology*, *27*(May). https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100211

Hidayatun, N., Ramadyanti, D., Koswanuddin, D., & Yunita, E. 2022. Diversity of Quantitative and Qualitative Characters of Rice Grain from Riau Province, Indonesia. *Buletin Plasma Nutfah*, *27*(2), 125. https://doi.org/10.21082/blpn.v27n2.2021.p125-132

Hwang, S. G., Kim, J. H., & Jang, C. S. 2016. A major QTL and a candidate gene for heading date in an early maturing rice mutant induced by gamma ray irradiation. *Genes and Genomics*, *38*(8), 747–756. https://doi.org/10.1007/s13258-016-0419-1

Hwang, S. G., Lee, S. C., Lee, J., Lee, J. W., Kim, J. H., Choi, S. Y., Kim, J. B., Choi, H. Il, & Jang, C. S. 2020. Resequencing of a Core Rice Mutant Population Induced by Gamma-Ray Irradiation and Its Application in a Genome-Wide Association Study. *Journal of Plant Biology*, *63*(6), 463–472. https://doi.org/10.1007/s12374-020-09266-2

Imam, Z., & Chakraborty, N. R. 2019. Induced macro mutational spectrum and frequency of viable mutants in m2 generation of non-basmati aromatic rice. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *8*(3), 2383–2386.

Islam, F., Azad, M. A. K., & Nath, U. K. 2014. Effect of Gamma Ray on Nerica-1 Rice and Selection of Desirable. *Bangladesh J. Nuclear Agric.*, *30*, 13–20.

Islam, M. M., Rahman, M. T., Hasanuzzaman, M., Islam, M. S., Uddin, M. I., & Saha, N. R. 2020. In vitro response and effect of gamma irradiation on four local indica rice varieties. *Journal of Scientific Agriculture*, *August*, 90–92. https://doi.org/10.25081/jsa.2020.v4.6307

Islam, M. Z., Khalequzzaman, M., Bashar, M.

K., Ivy, N. A., Mian, M. A. K., Pittendrigh, B. R., Haque, M. M., & Ali, M. P. 2018. Variability Assessment of Aromatic Rice Germplasm by Pheno-Genomic traits and Population Structure Analysis. *Scientific Reports*, *8*(1), 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-018-28001-z

Kadhimi, A. A., ALhasnawi, A. N., Isahak, A., Ashraf, M. F., Mohamad, A., Yusoff, W. M. W., & Zain1, C. R. C. M. 2016. Gamma radiosensitivity study on MRQ74 and MR269, two elite varieties of rice (Oryza Sativa L.). *Life Science Journal*, *13*(2), 85–91. https://doi.org/10.7537/marslsj13021614

Kant, A., & Chakraborty, N. R. (2021. Induction of mutation through gamma irradiation in non-basmati aromatic 'badshabhog' rice (Oryza sativa L.). *Applied Biological Research*, *23*(1), 50–59. https://doi.org/10.5958/0974-4517.2021.00007.0

Katiyar, P., Pandey, N., & Keshavkant, S. 2022. Gamma radiation: A potential tool for abiotic stress mitigation and management of agroecosystem. *Plant Stress*, *5*(December 2021), 100089. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100089

Kato, H., Li, F., & Shimizu, A. 2020. The selection of gamma-ray irradiated higher yield rice mutants by directed evolution method. *Plants*, *9*(1004), 1–16. https://doi.org/10.3390/plants9081004

Kumar, P., Prakash, K. S., Jan, K., Swer, T. L., Jan, S., Verma, R., Deepika, K., Dar, M. Z., Verma, K., & Bashir, K. 2017. Effects of gamma irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of brown rice starch. *Journal of Cereal Science*, *77*, 194–200. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.08.017

Kumbhar, S. D., Kulwal, P. L., Patil, J. V., Sarawate, C. D., Gaikwad, A. P., & Jadhav, A. S. 2015. Genetic diversity and population structure in landraces and improved rice varieties from India. *Rice Science*, *22*(3), 99–107. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2015.05.013

Lalitha, R., Arunachalam, P., Mothilal, A., Senthil, N., Hemalatha, G., Vanniarajan, C., & Souframanien, J. 2019. Radiation effect on germination and seedling traits in rice (Oryza sativa L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, *10*(3), 1038–1048. https://doi.org/10.5958/0975-928X.2019.00133.9

Lei, Q. Y., Zhou, J. J., Xiong, Y., Zhang, W. H., Luo, J., & Long, C. L. 2021. Genetic diversity evaluation and conservation of kam fragrant glutinous rice (Oryza sativa l.) germplasm in southeast Guizhou, China. *Plants*, *10*(1898), 1–16. https://doi.org/10.3390/plants10091898

Lei, Q., Zhou, J., Zhang, W., Luo, J., Wu, K., & Long, C. 2018. Morphological diversity of panicle traits in Kam fragrant glutinous rice (Oryza sativa). *Genetic Resources and Crop Evolution*, *65*, 775–786. https://doi.org/10.1007/s10722-017-0570-9

Li, F., Shimizu, A., Nishio, T., Tsutsumi, N., & Kato, H. 2019. Comparison and characterization of mutations induced by gamma-ray and carbon-ion irradiation in rice (Oryza sativa L.) using whole-genome resequencing. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, *9*(11), 3743–3751. https://doi.org/10.1534/g3.119.400555

Li, R., Li, M., Ashraf, U., Liu, S., & Zhang, J. 2019. Exploring the relationships between yield and yield-related traits for rice varieties released in china from 1978 to 2017. *Frontiers in Plant Science*, *10*(543), 1–12. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00543

Ma, L., Kong, F., Sun, K., Wang, T., & Guo, T. 2021. From Classical Radiation to Modern Radiation: Past, Present, and Future of Radiation Mutation Breeding. *Frontiers in Public Health*, *9*(December), 1–11. https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.768071

Maghuly, F., Bado, S., Jankowicz-Cieslak, J., & Laimer, M. 2017. Biotechnologies for Plant Mutation Breeding. In J. Jankowicz-Cieslak, T. H. Tai, J. Kumlehn, & B. J. Till (Eds.), *Biotechnologies for Plant Mutation Breeding: Protocols*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45021-6_7

Masoabi, M., Lloyd, J., Kossmann, J., & van der Vyver, C. 2018. Ethyl Methanesulfonate Mutagenesis and In Vitro Polyethylene Glycol Selection for Drought Tolerance in Sugarcane (Saccharum spp.). *Sugar Tech*, *20*(1), 50–59.

https://doi.org/10.1007/s12355-017-0524-8

Mehmood, S., Ud Din, I., Ullah, I., Mohamed, H. I., Basit, A., Khan, M. N., Hussain Shah, S. S., & ur Rehman, A. 2021. Agro-morphological and genetic diversity studies in Rice (Oryza sativa L.) germplasm using microsatellite markers. *Molecular Biology Reports*, *48*(11), 7179–7192. https://doi.org/10.1007/s11033-021-06710-5

Mohammed, J., Falusi, O., Daudu, O. A. Y., Abubakar, A., Muhammad, L. M., Salihu, B. Z., & Titus, S. D. 2018. Effects of gamma irradiation on submergence tolerance of two selected varieties of lowland rice (Oryza sativa L.). *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, *2*(3), 031–037. https://doi.org/10.30574/gscbps.2018.2.3.0017

Mounir, A. M., El-Hefny, A. M., Mahmoud, S. H., & El-Tanahy, A. M. M. 2022. Effect of low gamma irradiation doses on growth, productivity and chemical constituents of Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus) tubers. *Bulletin of the National Research Centre*, *46*(1). https://doi.org/10.1186/s42269-022-00838-5

Muto, C., Ebana, K., Kawano, K., Bounphanousay, V., Bounphanousay, C., Kanyavong, K., Inthapanya, P., Boualaphanh, C., Sato, T., Ishikawa, R., Sato, Y. I., Yanagihara, S., & Fukuta, Y. 2019. Genetic variation in rice (Oryza sativa L.) germplasm from northern Laos. *Breeding Science*, *69*(2), 272–278. https://doi.org/10.1270/jsbbs.18086

Nachimuthu, V. V., Raveendran, M., Duraialaguraja, S., Sivakami, R., Pandian, B. A., Ponniah, G., Gunasekaran, K., Swaminathan, M., K K, S., & Sabariappan, R. 2015. Analysis of Population Structure and Genetic Diversity in Rice Germplasm Using SSR Markers: An Initiative Towards Association Mapping of Agronomic Traits in Oryza Sativa. *Rice*, *8*(30), 1–24. https://doi.org/10.1186/s12284-015-0062-5

Njoroge, W., Kinyua, M., Gichuhi, E., Ankamah-yeboah, T., Kwame, S., & Ofori, K. 2022. Radio-Sensitivity of four selected rice (Oryza sativa L .) varieties in Kenya , as a pre-requisite for mutation breeding. *African Journal of Plant Science*, *16*(8), 210–223. https://doi.org/10.5897/AJPS2022.2278

Ocloo, F. C. K., Owureku-Asare, M., Agyei-Amponsah, J., Agbemavor, W. S. K., Egblewogbe, M. N. Y. H., Apea-Bah, F. B., Sarfo, A., Apatey, J., Doku, H., Ofori-Appiah, D., & Ayeh, E. 2017. Effect of gamma irradiation on physicochemical, functional and pasting properties of some locally-produced rice (Oryza spp) cultivars in Ghana. *Radiation Physics and Chemistry*, *130*, 196–201. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.08.025

Qi, W., Zhang, L., Wang, L., Xu, H., Jin, Q., & Jiao, Z. 2015. Pretreatment with low-dose gamma irradiation enhances tolerance to the stress of cadmium and lead in Arabidopsis thaliana seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *115*, 243–249. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.026

Qi, W., Zhang, L., Xu, H., Wang, L., & Jiao, Z. 2014. Physiological and molecular characterization of the enhanced salt tolerance induced by low-dose gamma irradiation in Arabidopsis seedlings. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *450*(2), 1010–1015. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2014.06.086

Sathesh-Prabu, C., & Lee, Y. K. 2016. Genetic variability and proteome profiling of a radiation induced cellulase mutant mushroom Pleurotus Florida. *Polish Journal of Microbiology*, *65*(3), 271–277. https://doi.org/10.5604/17331331.1215606

Shirasawa, K., Hirakawa, H., Nunome, T., Tabata, S., & Isobe, S. 2016. Genome-wide survey of artificial mutations induced by ethyl methanesulfonate and gamma rays in tomato. *Plant Biotechnology Journal*, *14*(1), 51–60. https://doi.org/10.1111/pbi.12348

Shu, Q. Y., B.P.Forster, & H.Nakagawa (Eds.). 2012. *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. CAB International CABI.

Smillie, I. R. A., Pyke, K. A., & Murchie, E. H. 2012. In Posidonia oceanica cadmium induces changes in DNA methylation and chromatin patterning. *Journal of Experimental Botany*, *63*(2), 695–709.

https://doi.org/10.1093/jxb/err313

Song, J. Y., Kim, D. S., Lee, M. C., Lee, K. J., Kim, J. B., Kim, S. H., Ha, B. K., Yun, S. J., & Kang, S. Y. 2012. Physiological characterization of gamma-ray induced salt tolerant rice mutants. *Australian Journal of Crop Science*, *6*(3), 421–429.

Spencer-Lopes, M. M., Forster, B. P., & Jankuloski, L. (Eds.). 2018. Manual on Mutation Breeding. In *Plant Breeding and Genetics Subprogramme Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture* (Third, pp. 1–319). FAO/IAEA.

Suliansyah, I. 2020. *Monograf Perbaikan Tanaman Melalui Teknologi Induksi Mutasi*. Penebar Media Pustaka.

Tiwaria, A. K., Sharmab, D., Dasc, B. K., Kumard, V., Sahue, P., Baghelf, S., & Singhg, S. 2018. Improvement of Traditional Local Rice Varieties through Induced Mutations Using Gamma Radiations. *International Interdisciplinary Research Journal*, *08*(02), 405–412. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21569.40801

Viana, V. E., Pegoraro, C., Busanello, C., & Costa de Oliveira, A. 2019. Mutagenesis in Rice: The Basis for Breeding a New Super Plant. *Frontiers in Plant Science*, *10*(1326), 1–28. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01326

Wang, X., Ma, R., Cui, D., Cao, Q., Shan, Z., & Jiao, Z. 2017. Physio-biochemical and molecular mechanism underlying the enhanced heavy metal tolerance in highland barley seedlings pre-treated with low-dose gamma irradiation. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14601-8

Warman, B., Suliansyah, I., Swasti, E., Syarif, A., & Alfi, H. 2015. Selection and semi-dwarf allele mutants segregation pattern as the result of gamma ray irradiation of West Sumatera black rice. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, *5*(5), 362–365. https://doi.org/10.18517/ijaseit.5.5.560

Weerakoon, S., & Somaratne, S. 2021. Development of a core collection from Sri Lankan traditional rice (Oryza sativa) varieties for phenotypic and genetic diversity. *Nusantara Bioscience*, *13*(1), 61–67. https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n130109

Zanzibar, M., & J. Sudrajat, D. 2016. Effect of gamma irradiation on seed germination, storage, and seedling growth of Magnolia champaca L. *Indonesian Journal of Forestry Research*, *3*(2), 95–106. https://doi.org/10.20886/ijfr.2016.3.2.95-106