

## Orientasi Dosis Iradiasi Efektif Pada Perbaikan Genetik Padi (*Oryza sativa* L.) Lokal Padang Pariaman Melalui Mutasi Induksi

### *Orientation of Effective Irradiation Dosage in Genetic Improvement of Padang Pariaman Local Rice (Oryza sativa L.) Through Induced Mutation*

Henny Puspita Sari<sup>1,2</sup>, Irfan Suliansyah<sup>3</sup>, Indra Dwipa<sup>3</sup> dan Dini Hervani<sup>3</sup>

Program Doktoral Ilmu Pertanian, Universitas Andalas, Sumatera Barat<sup>1</sup>  
Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Ekasakti, Sumatera Barat<sup>2</sup>  
Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas, Sumatera Barat<sup>3</sup>  
)Email : hennypuspitasaki@unespadang.ac.id

#### ABSTRAK

Peneliti menggunakan induksi mutasi pada padi untuk menciptakan keragaman genetik yang tinggi. Populasi dasar dengan keragaman genetik yang tinggi akan memudahkan proses seleksi karakter yang diinginkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dosis optimal yang menginduksi keragaman genetik tertinggi pada tiga genotipe padi sawah. Bahan penelitian adalah tiga genotipe padi sawah yaitu "Madang Pulau", "Putiah Papanai" dan "Banang Kuniang". Iradiasi gamma dilakukan di Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR) BATAN. Setiap genotipe diiradiasi dengan dosis 0, 100, 200, 300, 400 500 dan 600 Gy. Penyemaian dilakukan di lahan percobaan Fakultas Pertanian Universitas Ekasakti. Pengamatan dilakukan terhadap persentase kecambah (%), tinggi bibit dan panjang akar. Nilai LD50 ditentukan berdasarkan hasil analisis regresi persentase kecambah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) persentase kecambah yang tumbuh menurun seiring dengan peningkatan dosis iradiasi gamma, kecuali pada genotipe "Puputih Papanai", sedangkan tinggi bibit dan panjang akar untuk ketiga genotipe yang tumbuh menurun seiring dengan peningkatan dosis iradiasi gamma (2) nilai LD50 pada Genotype Madang Pulau, Putih Papanai, dan Banang Kuniang masing-masing adalah 333.58 Gy, 377.62 Gy, dan 291.14 Gy. (3) dosis optimal iradiasi sinar gamma

untuk ketiga genotype berkisar pada dosis 200-300 Gy. (4) Di antara tiga genotipe padi yang diuji, mutan "Banang Kuniang".

Kata Kunci: Induksi Mutasi, LD50, Iradiasi, Padi Lokal.

#### ABSTRACT

*Researchers use mutation induction in rice to create high genetic diversity. The basic population with high genetic diversity will facilitate the process of selecting the desired character. This study aims to determine the optimal dose that induces the highest genetic diversity in three lowland rice genotypes. The research materials were three lowland rice genotypes namely "Madang Pulau", "Putiah Papanai" and "Banang Kuniang". Gamma irradiation was carried out at the BATAN Isotope and Radiation Application Center (PAIR). Each genotype was irradiated with doses of 0, 100, 200, 300, 400, 500 and 600 Gy. Seeding was carried out in the experimental field of the Faculty of Agriculture, University of Ekasakti. Observations were made on the percentage of sprouts (%), seedling height and root length. The LD50 value was determined based on the results of the sprout percentage regression analysis. The results showed that (1) the percentage of sprouts that grew decreased with an increase in the dose of gamma irradiation, except for the "Puputih Papanai" genotype, while the seedling height and root length for the three genotypes that*

*grew decreased with an increase in the dose of gamma irradiation (2) the LD50 value the Madang Pulau, Putih Papanai, and Banang Kuniang genotypes were 333.58 Gy, 377.62 Gy, and 291.14 Gy, respectively. (3) the optimal dose of gamma irradiation for the three genotypes ranges from 200-300 Gy. (4) Among the three rice genotypes tested, the "Banang Kuniang" mutant.*

**Keywords:** *Mutation Induction, LD50, Irradiation, Local Rice, Padang Pariaman.*

## PENDAHULUAN

Padi (*Oryza sativa* L.) adalah salah satu tanaman sereal terpenting yang ditanam di seluruh dunia, yang merupakan makanan pokok di sejumlah wilayah, terutama Asia, dan dianggap sebagai komoditas penting yang paling strategis karena terkait erat dengan masalah ketahanan pangan, ekspansi ekonomi, lapangan kerja, serta norma budaya. Di Asia, China menjadi negara penghasil beras terbesar pada tahun 2022, sedangkan Indonesia tercatat sebagai negara keempat penghasil beras dengan produksi 34,6 juta metrik ton beras di area seluas 11.40 juta ha (USDA, 2023), namun sistem produksi beras di Asia dalam beberapa tahun terakhir mendapat tantangan baru dari pertumbuhan penduduk dan perubahan iklim yang berdampak pada tekanan lingkungan, alih fungsi lahan pertanian, dan perubahan preferensi konsumen terhadap kualitas pangan.

Menurut Abdelnour-Esquivel *et al.*, (2020) konsumsi beras dunia diproyeksikan mencapai 763 juta metrik ton pada tahun 2020 dan akan meningkat menjadi 852 juta ton pada tahun 2035. Agar berkelanjutan, pertumbuhan penduduk dunia harus disertai dengan peningkatan yang sebanding dalam produksi dan pasokan pangan. Sejumlah program penanganan dan evaluasi galur plasma nutfah padi, dan pemuliaan telah dikembangkan untuk memelopori peningkatan produksi padi dan peningkatan kualitasnya.

Indonesia kaya akan keanekaragaman hayati padi, berdasarkan data Pendaftaran Varietas Tanaman Hasil Pemuliaan hingga tahun 2022 di mana lebih dari 1.687 varietas plasma nutfah padi telah tercatat dari 2.210 varietas lokal yang ada di seluruh Indonesia. Landrace/varietas padi lokal di setiap negara merupakan bahan genetik potensial yang perlu ditingkatkan genetiknya dengan pendekatan pemuliaan yang paralel dengan kegiatan konservasi, karena perubahan iklim yang tidak terduga yang sedang berlangsung adalah masalah inti dalam mengurangi hasil produksi. Sementara tingkat mutasi alami pada tanaman jarang terjadi, sehingga penggunaan pemuliaan mutasi sangat diperlukan untuk mengembangkan padi varietas baru berbasis plasma nutfah padi lokal.

Provinsi Sumatera Barat memiliki variasi genetik padi lokal yang cukup tinggi. Beberapa keunggulan beras lokal antara lain pemeliharaan yang rendah, persyaratan masukan yang rendah, daya adaptasi yang sangat baik, cita rasa yang disukai masyarakat, toleransi cekaman yang tinggi, dan potensi hasil tinggi. Varietas lokal, bagaimanapun, memiliki kekurangan tertentu, seperti umur yang lebih panjang dan tinggi tanaman yang lebih tinggi, yang membuatnya lebih rentan untuk rebah. Oleh karena itu, salah satu pilihan untuk mempercepat upaya pemuliaan adalah dengan memanfaatkan teknik mutasi untuk pemuliaan padi lokal. Pemuliaan tanaman padi bertujuan untuk menghasilkan varietas baru yang memiliki sifat unggul sesuai dengan tipe daerahnya (Ye *et al.*, 2021).

Mutasi adalah proses perubahan struktur gen atau kromosom yang mengakibatkan perubahan fenotipe yang diwariskan dari satu generasi ke generasi lainnya (Ahloowalia *et al.*, 2004). Mutasi dapat diinduksi menggunakan mutagen fisik atau kimia. Mutagenesis fisik meliputi penyinaran dengan sinar gamma non-pengion, sinar alfa dan beta, neutron cepat dan lambat (Kodym & Afza, 2003). Sinar gamma adalah mutagen fisik yang digunakan dalam mutagenesis tanaman (Sathesh-Prabu & Lee, 2016) dan aman

bagi kesehatan manusia karena varian yang diinduksi tidak menimbulkan kerusakan lingkungan (Kodym & Afza, 2003). Penting untuk mengembangkan varietas tanaman mutan dan meningkatkan genetika, sinar gamma lebih efektif dan hemat biaya daripada radiasi pengion lainnya karena kemudahan akses dan daya tembus yang lebih besar (Riviello-Flores *et al.*, 2022). Mutasi yang diharapkan dapat menyebabkan keanekaragaman pada sifat-sifat yang akan diseleksi sehingga sifat yang unggul dapat diseleksi secara selektif sedangkan sifat yang baik pada varietas asli tetap dipertahankan.

Salah satu strategi yang digunakan dalam perbanyakan mutasi adalah pemanfaatan partikel gamma (Gowthami *et al.*, 2017). Menurut Efendi *et al.*, (2017), sinar gamma merupakan jenis radiasi elektromagnetik yang memiliki tingkat energi tertinggi, yang dapat mengubah karakteristik fisiologis dan memberikan strategi alternatif untuk produksi sumber genetik baru. Beberapa peneliti berpendapat bahwa iradiasi sinar gamma menyebabkan perkecambahan biji lebih cepat. Hal ini disebabkan foton sinar gamma dengan panjang gelombang pendek lebih kuat dari foton cahaya tampak sehingga efeknya lebih kuat pada permukaan sel tumbuhan. Hal ini menyebabkan rusaknya lapisan kulit biji yang memungkinkan perkecambahan lebih cepat (Ayneband & Afsharinafar, 2012).

Menurut Ayneband & Afsharinafar (2012), radiasi sinar gamma dengan dosis 250 Gy dapat meningkatkan daya kecambah, keseragaman kemunculan benih, tinggi tanaman, jumlah daun dan jumlah anakan tanaman padi. Selain itu, dosis efektif iradiasi sinar gamma dengan dosis 200 Gy mampu meningkatkan laju pertumbuhan potensial, daya kecambah, indeks vigor, laju pertumbuhan relatif dan keseragaman kemunculan benih (Untari *et al.*, 2021). Namun dosis iradiasi sinar gamma yang dibutuhkan bervariasi tergantung genotipe padi. Sinar gamma dosis rendah tidak menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap perkecambahan biji. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa dosis 300 Gy menyebabkan penurunan

persentase perkecambahan (Haris *et al.*, 2013). Harding *et al.*, (2012), mengemukakan bahwa peningkatan dosis iradiasi sinar gamma di atas 300 Gy menyebabkan kerusakan fisiologis yang parah pada tinggi bibit, persentase kelangsungan hidup di lapangan dan produksi. Iradiasi yang dilakukan pada tanaman pangan khususnya padi, dimaksudkan untuk mengurangi sifat negatif dan meningkatkan sifat positif dari fenotipenya. Induksi mutasi dengan radiasi merupakan metode yang paling sering digunakan untuk mengembangkan varietas mutan langsung. Tujuan penelitian teknik iradiasi sinar gamma pada varietas padi lokal Kabupaten Padang Pariaman digunakan dalam penelitian ini untuk menghasilkan mutan dengan sifat-sifat yang diinginkan, dengan melihat tingkat viabilitas dan vigor benih padi melalui mutasi induksi iradiasi sinar gamma, sehingga didapatkan dosis yang optimum untuk digunakan dalam penelitian lebih lanjut.

## **BAHAN DAN METODE PENELITIAN**

### **Tempat dan Waktu**

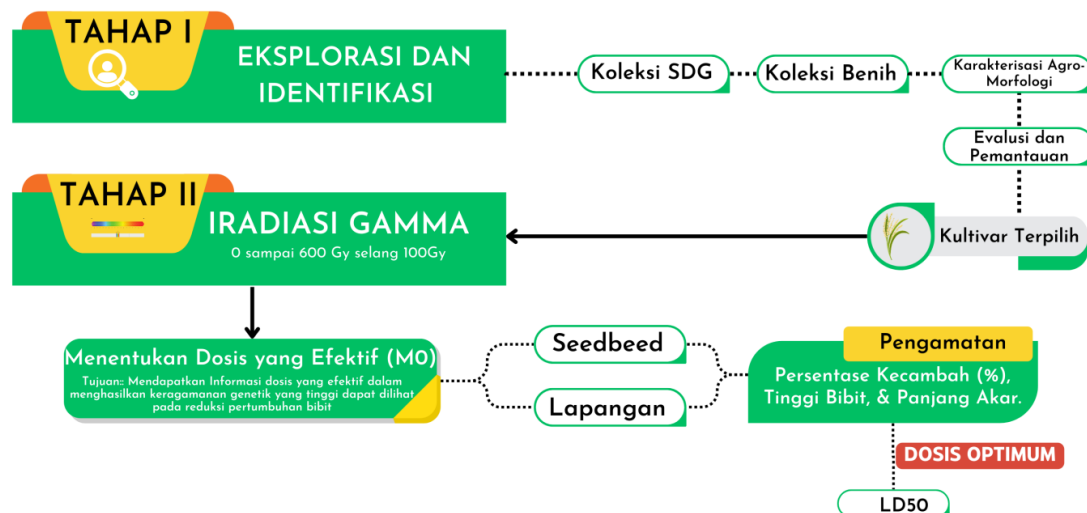
Iradiasi sinar gamma dilakukan pada bulan Januari 2023 di Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR), Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Pasar Jumat, Jakarta, sedangkan penanaman M0 dilakukan di Kebun Percobaan Universitas Ekasakti pada bulan Maret 2023.

### **Bahan dan Alat**

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah genotipe padi lokal Padang Pariaman yang telah terpilih yaitu : Madang Pulau (V1), Putih Papanai (V2), dan Banang Kuniang (V3), tanah top soil, sekam padi, pupuk kandang sapi. Alat yang digunakan yaitu penggaris/meteran, kamera, gunting, spidol permanent, pena, seedbed dan label.

### **Rancangan Penelitian**

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) pola faktorial yang terdiri dari dua faktor. Faktor pertama yaitu genotipe padi lokal Padang



**Gambar 1.** Orientasi Dosis Iradiasi Efektif Pada Perbaikan Genetik Padi (*Oryza sativa* L.) Lokal Padang Pariaman Melalui Mutasi Induksi

Pariaman yang telah terpilih yaitu : Madang Pulau (V1), Putih Papanai (V2), dan Banang Kuniang (V3). Faktor kedua yaitu iradiasi sinar gamma pada dosis sebagai berikut: R<sub>0</sub>: 0 Gy (kontrol/tanpa dosis radiasi); R<sub>1</sub>: 100 Gy; R<sub>2</sub>: 200 Gy; R<sub>3</sub>: 300 Gy; R<sub>4</sub>: 400 Gy; R<sub>5</sub>: 500 Gy; dan R<sub>6</sub>: 600 Gy. Perlakuan masing-masing diulang sebanyak 3 kali. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

#### Pelaksanaan Penelitian

1. Benih dimasukkan kedalam 18 kantong kain masing-masing seberat 500 g untuk diiradiasi dengan sinar gamma pada dosis sebagai berikut: R<sub>0</sub>: 0 Gy (kontrol/tanpa dosis radiasi); R<sub>1</sub>: 100 Gy; R<sub>2</sub>: 200 Gy; R<sub>3</sub>: 300 Gy; R<sub>4</sub>: 400 Gy; R<sub>5</sub>: 500 Gy; dan R<sub>6</sub>: 600 Gy. Paparan iradiasi diukur dalam Gray (Gy), dimana 1 Gy sama dengan 0,01 krad, atau Jenegri/kg massa yang diiradiasi.
2. Dosis dari masing-masing perlakuan iradiasi disemai berbaris sebanyak 100 benih pada masing-masing varietas.
3. Benih disemai dalam *seedbed* yang berisi media tanam top soil, kompos dan sekam padi dengan perbandingan 1:1:1.

#### Parametar Pengamatan

Parameter yang diamati pada percobaan ini adalah:

1. Persentase Kecambah (%)  
Persentase perkecambahan (%) merupakan parameter yang sering digunakan untuk pengukuran vigor benih. Persentase perkecambahan adalah jumlah bibit normal pada hari terakhir uji perkecambahan, dan dikaitkan dengan potensi bibit normal pada kondisi lapangan. Persentase daya kecambah diamati pada 11 dan 21 hari setelah semai (HSS). Menurut ISTA (2007), daya berkecambah dihitung dengan menggunakan rumus:
 
$$\% \text{ Kecambah} = \frac{\text{jumlah benih yang berkecambah}}{\text{jumlah benih yang dikecambahkan}} \times 100$$
2. Tinggi Bibit (cm)  
Tinggi bibit biasanya digunakan sebagai indikator respons genotipe terhadap mutagen. Pengaruh iradiasi terhadap tinggi bibit dalam penelitian ini diamati pada umur 21 HST.
3. Panjang Akar (cm)  
Pengamatan panjang akar dilakukan dengan cara mengukur pangkal hingga ujung akar pada umur 21 HST.
4. Nilai *Lethal Dose* 50 (LD<sub>50</sub>)

Nilai LD<sub>50</sub> sinar gamma untuk ketiga genotipe dihitung berdasarkan persentase kecambah yang didapat.

Data hasil pengamatan terakhir dianalisis secara sidik ragam dengan uji F. Jika F Hitung perlakuan lebih besar dari F tabel 5% maka dilanjutkan dengan Uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) menggunakan software STAR (*Statistical Tool for Agricultural Research*), sementara nilai *Lethal Dose 50* (LD50) dianalisis menggunakan SPSS 23.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakter Morfologi pada Fase Bibit

Dalam penelitian ini, iradiasi sinar gamma diberikan pada tahap benih dengan dosis 0, 100 Gy, 200 Gy, 300 Gy, 400 Gy, 500 Gy dan 600 Gy. Selanjutnya, membandingkan efek iradiasi pada persentase perkecambahan, tinggi bibit dan panjang akar (Tabel 1). Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan respon biologis tanaman yang berbeda terhadap stres oksidatif yang diinduksi oleh iradiasi akut dan kronis pada padi dan strategi bertahan hidup yang digunakan tanaman untuk mengatasi stres ini.

#### 1. Persentase Kecambah (%)

Kemampuan bibit padi genotipe Madang Pulau, Putih Papanai, dan Banang Kuning generasi M<sub>0</sub> untuk berkecambah diamati pada umur 21 HST. Genotipe Madang Pulau, nilai persentase perkecambahan tertinggi terdapat pada kontrol dengan nilai sebesar 85.67%. Genotipe Putih Papanai, nilai persentase perkecambahan tertinggi terdapat pada dosis 100 Gy dengan nilai sebesar 97%, sedangkan genotipe Banang Kuning nilai persentase perkecambahan tertinggi terdapat pada kontrol dengan nilai sebesar 73% (Tabel 1). Perlakuan iradiasi dosis 0-300 Gy pada ketiga varietas berbeda nyata dengan perlakuan iradiasi dosis tinggi (400-600 Gy). Hal ini dikarenakan pada dosis tinggi terjadi kerusakan sel yang lebih besar yang ditandai dengan penurunan nilai persentase perkecambahan (Gambar 2).

Menurut Jaipo *et al.*, (2019), ada banyak efek yang ditimbulkan oleh radiasi

gamma mulai dari dosis rendah hingga dosis tinggi. Dosis tinggi dapat menghambat pertumbuhan secara dominan, sehingga cocok untuk sterilisasi. Dosis optimal digunakan untuk pemuliaan mutasi, sedangkan dosis rendah untuk merangsang dan meningkatkan perkecambahan serta pertumbuhan tanaman. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian, genotipe Madang Pulau dan Banang Kuning terjadi penurunan persentase kecambah secara signifikan pada dosis 400 Gy, berbeda halnya dengan varietas Putih Papanai. Dosis 100, 200, dan 300 Gy (97%, 95% dan 90%) dapat meningkatkan persentase kecambah jika dibandingkan dengan kontrol (87%), sedangkan pada dosis 400, 500 dan 600 Gy terjadi penurunan persentase kecambah secara signifikan.

Sejalan dengan penelitian Tatar *et al.*, (2020), radiasi gamma pada dosis 350 Gy memberikan mutasi pada sel benih yang diradiasikan yang berkontribusi pada kondisi optimal, yang mengarah ke perkecambahan dan perkembangan maksimum menjadi bibit lebih awal dari dosis lainnya. Lagoda (2012) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa kerusakan genetik dan fisiologis sel embrio oleh mutagenesis bertanggungjawab atas rendahnya perkecambahan biji, menyebabkan mutasi, kematian sel, pembelahan sel yang tidak normal, kerusakan jaringan dan organ, serta pengurangan pertumbuhan tanaman. Sejalan dengan penelitian Kadhimi *et al.*, (2016), Gowthami *et al.*, (2017), Al-Mamari & Ghanim (2018), penurunan persentase perkecambahan benih padi dengan peningkatan dosis radiasi gamma.

Menurut Jaipo *et al.*, (2019), radiasi gamma dosis rendah dapat merangsang aktivasi enzim, pertumbuhan embrio muda, dan meningkatkan pembelahan sel serta dapat menguntungkan pertumbuhan vegetatif. Kerusakan biologis yang disebabkan oleh mutagen pada generasi M<sub>0</sub> dapat diperkirakan berdasarkan perkecambahan biji dan kelangsungan hidup tanaman.

**Tabel 1.** Pengaruh Iradiasi terhadap Karakter Morfologi Tanaman Pada Fase Bibit Padi Lokal Padang Pariaman

Perlakuan		Pengamatan			
Varietas	Dosis	Persentase Kecambah	Tinggi Bibit	Panjang Akar	LD50
Madang Pulau	0 Gy	85.67 a	27.79 a	5.34 a	Persamaan $y = -0.1465 x + 98.869$ Nilai LD50: 333.58 Gy
	100 Gy	79.33 ab	27.35 ab	4.60 b	
	200 Gy	76.33 b	24.85 b	4.59 b	
	300 Gy	74.33 b	18.98 c	4.43 b	
	400 Gy	55.67 c	14.15 d	3.23 c	
	500 Gy	13.00 d	6.85 e	2.67 c	
	600 Gy	0.00 e	0.00 f	0.00 d	
	<b>KK</b>		<b>8.56%</b>	<b>9.93%</b>	<b>10.63%</b>
Putiah Papanai	0 Gy	87.00 b	27.56 a	6.26 a	Persamaan $y = -0.1712 x + 113.26$ Nilai LD50: 377.62 Gy
	100 Gy	97.00 a	26.41 a	5.94 ab	
	200 Gy	95.00 ab	22.74 b	5.65 ab	
	300 Gy	90.00 ab	18.80 c	5.36 b	
	400 Gy	58.00 c	11.67 d	4.50 c	
	500 Gy	6.33 d	3.96 e	2.27 d	
	600 Gy	0.00 d	0.00 f	0.00 e	
	<b>KK</b>		<b>8.56%</b>	<b>9.93%</b>	<b>10.63%</b>
Banang Kuning	0 Gy	73.00 a	26.99 a	5.23 a	Persamaan $y = -0.1176 x + 84.238$ Nilai LD50: 291.14 Gy
	100 Gy	71.33 ab	24.09 b	4.98 a	
	200 Gy	64.67 bc	22.41 bc	4.67 a	
	300 Gy	60.33 c	19.90 c	3.87 b	
	400 Gy	49.67 d	14.27 d	3.72 b	
	500 Gy	23.67 e	9.38 e	3.23 b	
	600 Gy	0.00 f	0.00 f	0.00 c	
	<b>KK</b>		<b>8.56%</b>	<b>9.93%</b>	<b>10.63%</b>

Keterangan : Bilangan yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama, tidak berbeda nyata pada uji DNMRT 5%.

Gaul (1970), melaporkan bahwa kerusakan bahan biologis akan tercermin

dalam parameter di atas dan dapat dianggap sebagai indikasi efek mutagenik.

Persentase perkecambahan biji berkurang secara progresif dengan peningkatan dosis mutagen dan penurunan yang lebih besar terlihat pada dosis yang lebih tinggi pada ketiga varietas. Penurunan perkecambahan tergantung dosis seperti itu dilaporkan sebelumnya oleh Chaudhuri (2002), Tabasum *et al.*, (2011), Talebi *et al.*, (2012), dan Vasline (2013).

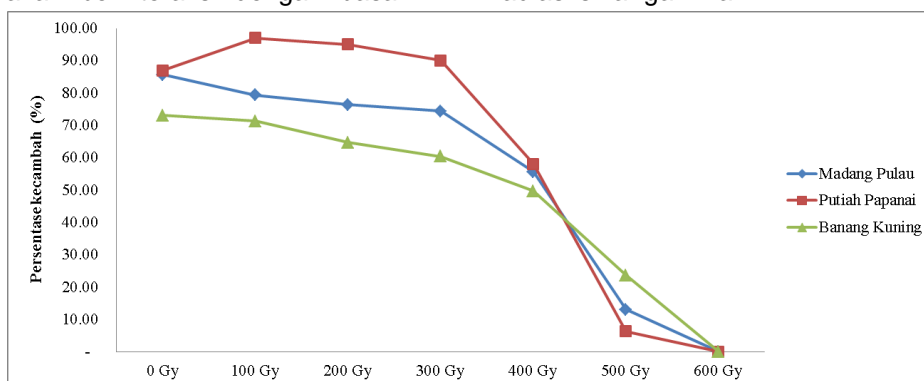
Efek peningkatan radiasi gamma pada perkecambahan dapat dikaitkan dengan asam ribonukleat (RNA) atau aktivasi sintesis protein, yang terjadi selama tahap awal perkecambahan (Kuzin *et al.*, 1976; Abdel-Hady *et al.*, 2008). Radikal bebas yang dihasilkan karena iradiasi gamma dapat bertindak sebagai sinyal stres dan memicu respon stres pada tanaman, sehingga sintesis asam polifenol meningkat yang memiliki sifat antioksidan (Pradhan *et al.*, 2020). Penurunan perkecambahan pada dosis yang lebih tinggi dari mutagen juga dapat dikaitkan dengan gangguan pada tingkat sel (disebabkan baik pada tingkat fisiologis atau fisik) termasuk kerusakan kromosom atau karena efek gabungan dari keduanya (Khan dan Tyagi, 2010).

Gowthami *et al.*, (2017) menyatakan bahwa meningkatnya frekuensi kerusakan kromosom dengan meningkatnya dosis iradiasi disebabkan oleh ionisasi molekul atau atom yang menyebabkan perubahan DNA pada materi yang diradiasi. Kadar air dalam gabah yang diradiasi akan bereaksi dengan energi radiasi untuk membentuk radikal bebas. Radikal bebas yang terbentuk akan berinteraksi dengan basa

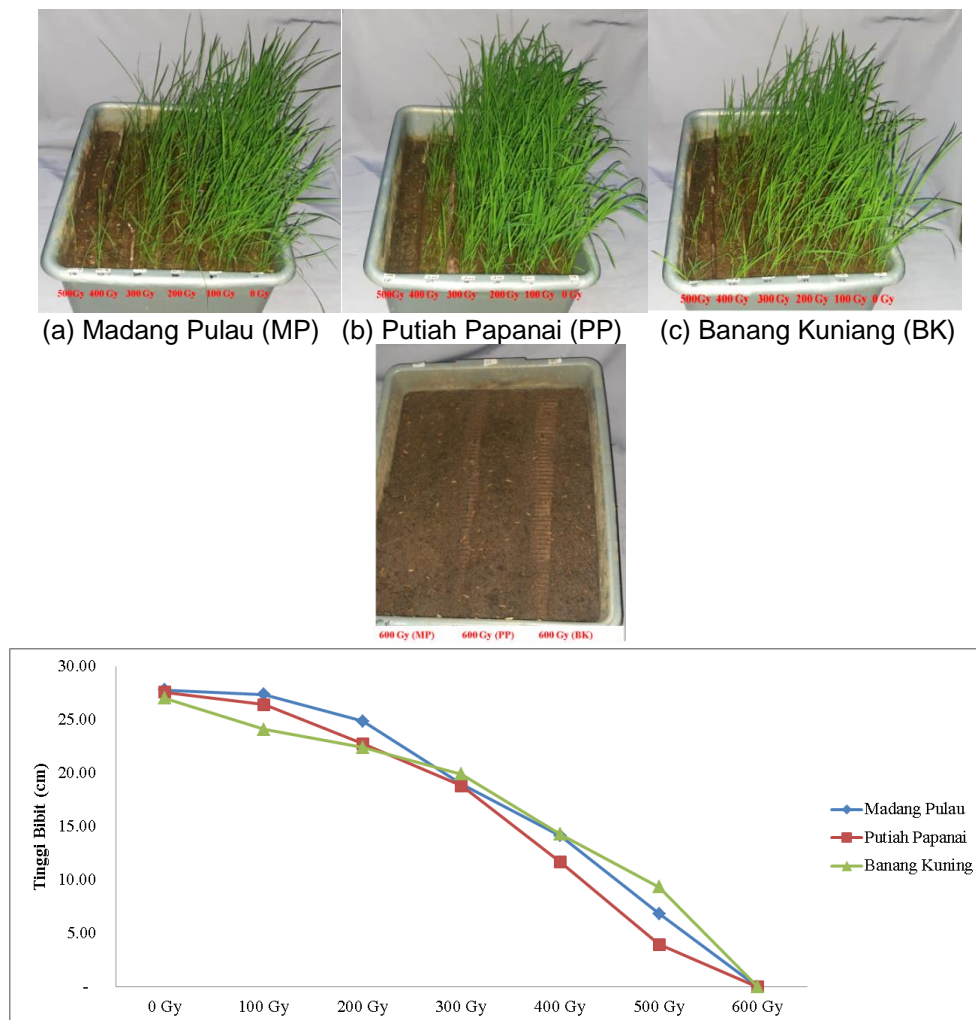
nitrogen DNA atau merusak kode genetik enzim amilase. Jika jumlah basa ionisasi melimpah, hal tersebut dapat menyebabkan penghapusan basa (*base deletion*) yang dapat menghambat perkecambahan. Jan *et al.*, (2012), menambahkan bahwa radikal bebas yang terbentuk selama proses radiasi dapat merusak komponen sel tumbuhan yang berakibat pada kerusakan morfologi, biokimia, dan fisiologi tanaman.

## 2. Tinggi Bibit (cm)

Tinggi bibit biasanya digunakan sebagai indikator respons genotipe terhadap mutagen. Pengaruh iradiasi terhadap tinggi bibit dalam penelitian ini diamati pada umur 21 HST. Bibit tertinggi pada ketiga genotipe terdapat pada dosis 0 Gy dengan nilai sebesar 27.79 cm pada genotipe Madang Pulau, 27.56 cm genotipe Putih Papanai, dan 26.99 cm pada genotipe Banang Kuning (Tabel 1). Gambar 3 menunjukkan penurunan pertumbuhan bibit dengan peningkatan dosis iradiasi gamma pada tiga genotipe padi lokal Kabupaten Padang Pariaman dengan tingkat toleransi radiasi yang bervariasi. Tinggi bibit pada genotipe Madang Pulau, Putih Papanai, dan Banang Kuning generasi  $M_0$  mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya dosis iradiasi. Genotipe Putih Papanai memiliki pembentukan bibit yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan Madang Pulau dan Banang Kuning pada dosis 500 Gy, ini menunjukkan bahwa genotipe Banang Kuning lebih toleran terhadap radiasi sinar gamma.



Gambar 2. Pengaruh iradiasi terhadap persentase perkecambahan pada varietas lokal Padang Pariaman generasi  $M_0$



**Gambar 3.** Pengaruh iradiasi terhadap persentase perkecambahan pada varietas lokal Padang Pariaman generasi  $M_0$

Terjadi penurunan tinggi tanaman dengan peningkatan dosis sinar gamma (Tabasum *et al.*, 2011; Ramchander *et al.*, 2015). Studi ini menunjukkan pengurangan tinggi tanaman secara bertahap di semua perlakuan sinar gamma dibandingkan dengan kontrol dan ini tidak menunjukkan mode linier dan ketergantungan dosis dan ditemukan perbedaan tinggi tanaman yang tidak nyata antara kontrol dan semua perlakuan kecuali dosis tertinggi; 500 Gy (El-Degwy, 2013). Tinggi bibit secara luas digunakan sebagai indeks untuk menentukan efek biologis dari berbagai mutagen fisik pada generasi  $M_0$ , yang mungkin disebabkan oleh proses

metabolisme, terpengaruh pada tingkat embrionik (Shu *et al.*, 2012).

Sparrow (1961), saat meneliti efek sitologis radiasi, menyimpulkan bahwa penurunan pertumbuhan vegetatif akibat dari perubahan sitologis yang diinduksi radiasi seperti kerusakan kromosom, penghambatan pembelahan mitosis degenerasi nukleus, dan pembesaran sel. Gowthami *et al.*, (2017) menyatakan bahwa penurunan tinggi bibit efek radiasi gamma dapat dikaitkan dengan kerusakan pada saat proses pembelahan sel. Iradiasi benih dengan sinar gamma dapat mengganggu sintesis DNA, sintesis protein, dan keseimbangan hormon tanaman. Menurut Jan *et al.*, (2012), perawatan radiasi



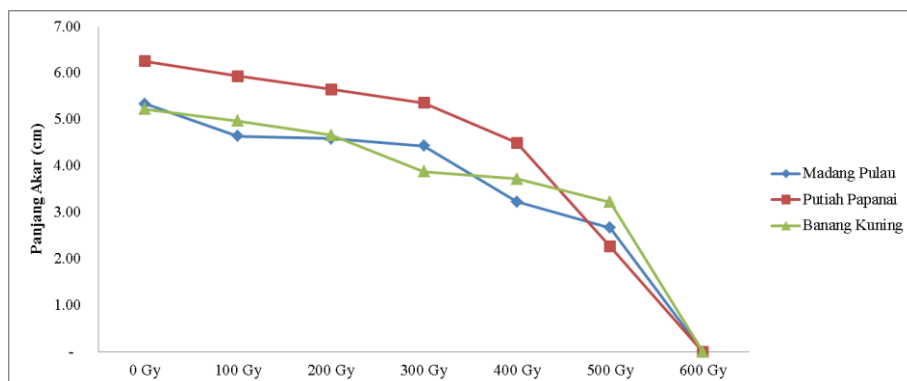
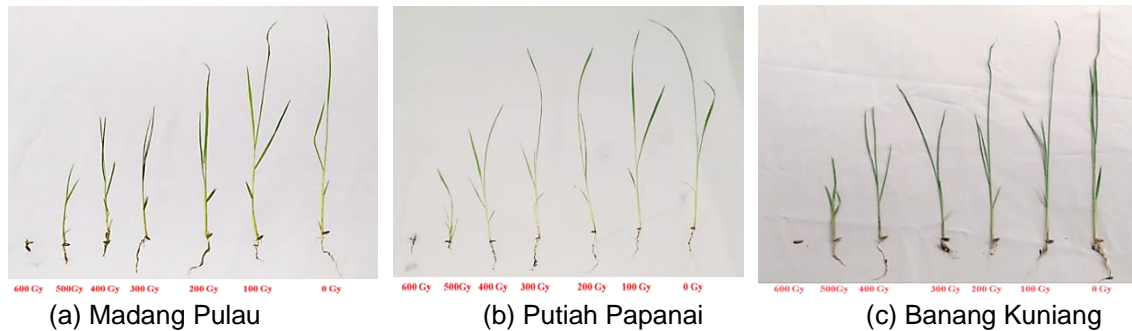
gamma dapat menghambat sintesis hormon auxin yang memainkan peran dalam pertumbuhan tanaman.

**3. Panjang Akar (cm)**

Berdasarkan hasil penelitian, ketika dosis radiasi gamma meningkat, panjang akar secara bertahap menurun. Radiasi gamma ini telah mempengaruhi perkembangan akar, yang tidak mampu tumbuh maksimal dibandingkan dengan kontrol. Pengaruh iradiasi terhadap panjang akar diamati pada 21 HST. Panjang akar tertinggi pada genotipe Madang Pulau terdapat pada dosis 0 Gy sebesar 5.34 cm dan berbeda nyata dengan perlakuan dosis iradiasi lainnya. Pada genotipe Putih Papanai, panjang akar tertinggi terdapat pada dosis 0 Gy sebesar 6.26 cm dan berbeda nyata dengan perlakuan dosis iradiasi 300, 400 dan 500 Gy. Pada genotipe Banang Kuning, panjang akar tertinggi terdapat pada dosis 0 Gy sebesar 5.23 cm dan berbeda nyata dengan perlakuan dosis iradiasi 300, 400 dan 500

Gy. Panjang akar dengan nilai terendah terdapat pada dosis 500 Gy pada ketiga genotipe (Gambar 4). Hal yang sama dilaporkan dalam penelitian Gowthami *et al.*, (2017), pemanjangan akar bibit padi menurun seiring peningkatan dosis radiasi gamma.

Menurut teori hormesis radiasi, iradiasi gamma dengan dosis rendah berpengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman (Baldwin & Grantham, 2015; Volkova *et al.*, 2022). Namun, paparan iradiasi gamma dosis tinggi di atas ambang batas tertentu memiliki efek negatif pada pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Jan *et al.*, 2012). Alasan, mengapa iradiasi gamma menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman, diperumit oleh efek radiasi langsung dan tidak langsung, di antaranya pengurangan kapasitas fotosintesis dianggap sebagai salah satu faktor yang paling penting (De Micco *et al.*, 2011; Marcu *et al.*, 2013); Hong *et al.*, 2018).



Gambar 4. Pengaruh iradiasi terhadap persentase perkecambahan pada varietas lokal Padang Pariaman generasi M<sub>0</sub>

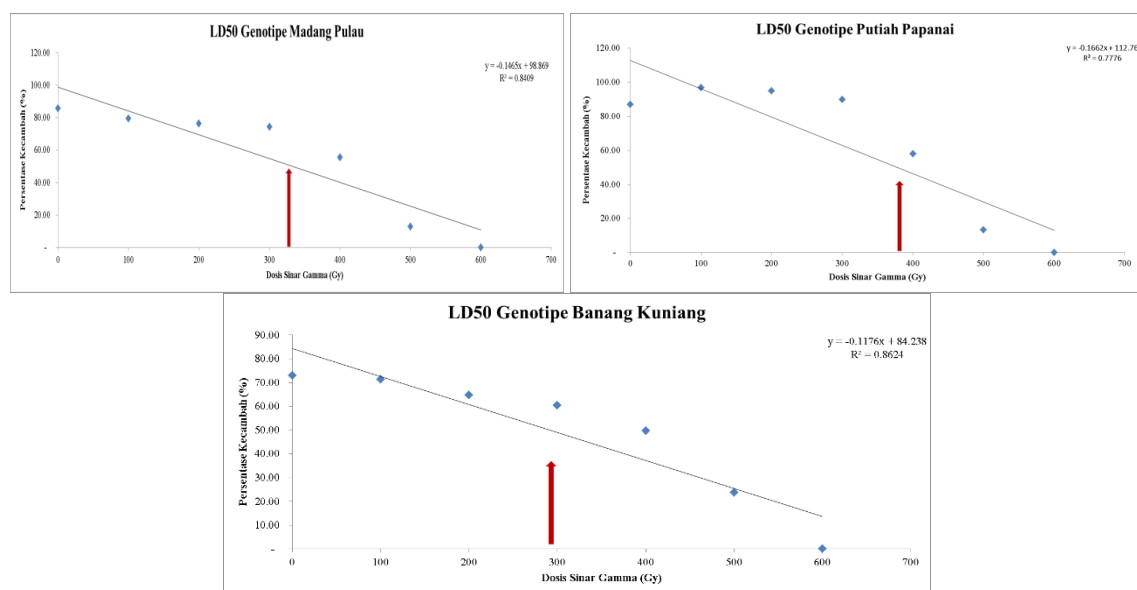
Gowthami *et al.*, (2017) menyatakan bahwa penghambatan pertumbuhan panjang akar pada perlakuan dosis tinggi disebabkan oleh terhambatnya aktivitas mitosis sel pada jaringan meristematis yang diakibatkan oleh perlakuan mutagenik. Selanjutnya dalam penelitian Crouthamel (1975) dan Jankowicz-Cieslak *et al.*, (2017) menjelaskan bahwa, penghambatan perkembangan akar juga dikaitkan dengan adanya oksigen reaktif yang merusak regulasi transkripsi gen encoding enzim amilase. Amilase merupakan enzim yang berfungsi sebagai katalis dalam hidrolisis natrium menjadi maltosa dan glukosa. Maltosa dan glukosa digunakan sebagai sumber energi selama fase germinasi benih dan pembentukan akar.

#### Nilai *Lethal Dose 50* (LD<sub>50</sub>) Padi Lokal Padang Pariaman

Setiap genotipe menunjukkan respons yang berbeda terhadap radiasi gamma yang dapat diketahui melalui radiosensitivitas, yaitu tingkat sensitivitas genotipe terhadap dosis radiasi. Salah satu cara untuk menentukan sensitivitas radiasi suatu genotipe adalah dengan menentukan nilai LD<sub>50</sub>. Menentukan nilai LD<sub>50</sub> dalam generasi M<sub>0</sub> adalah penting untuk mengetahui dosis yang tepat dalam

menghasilkan keragaman tinggi pada karakter yang diinginkan.

Padi lokal Padang Pariaman genotipe Madang Pulau, Putih Papanai dan Banang Kuniang diradiasi pada taraf dosis 0 hingga 600 Gy dengan selang dosis 100 Gy menggunakan sinar gamma Cobalt 60 (C<sub>60</sub>). Dosis iradiasi yang menyebabkan kematian tanaman sebanyak 50% (LD<sub>50</sub>) pada varietas Madang Pulau, Putih Papanai dan Banang Kuniang generasi M<sub>0</sub> dihitung menggunakan persamaan regresi linear (Gambar 4), dari analisis persentase perkecambahan. Nilai LD<sub>50</sub> pada genotipe Madang Pulau, Putih Papanai, dan Banang Kuniang masing-masing adalah 333.58 Gy, 377.62 Gy, dan 291.14 Gy. Kemampuan tumbuh mutan padi lokal "Putih Papanai" lebih tinggi dibandingkan dengan Madang Pulau dan Banang Kuniang. Pada dosis 500 Gy tidak ada benih yang bertahan hingga 14 hari perkecambahan, dan pada dosis 600 Gy tidak ada benih yang tumbuh, berbeda dengan hasil penelitian Harding *et al.*, (2012) benih bertahan hingga dosis 600 Gy. Hal ini dapat terjadi karena sensitivitas yang berbeda dari genotipe yang berbeda terhadap iradiasi sinar gamma. Induksi mutasi diharapkan menghasilkan keragaman yang tinggi pada sifat-sifat yang akan diseleksi dengan tetap



Gambar 4. Nilai LD<sub>50</sub> Radiasi Gamma di Tiga Genotipe Padi Lokal Padang Pariaman

mempertahankan karakter asli yang baik pada tanaman. Tingkat keberhasilan iradiasi sinar gamma dalam meningkatkan keragaman genetik suatu populasi ditentukan oleh radiosensitivitas genotipe yang diiradiasi.

Sensitivitas Putih Papanai paling rendah dibandingkan kedua genotipe lain yang diuji, hal ini ditunjukkan dengan nilai LD<sub>50</sub> mutan padi Putih Papanai tertinggi (377.62 Gy). Ramchander *et al.*, (2015) pada penelitiannya melaporkan bahwa nilai LD<sub>50</sub> yang dihasilkan dari dua genotipe White Ponni dan BPT 5204 di India masing-masing adalah 354.80 Gy dan 288.40 Gy, varietas White Ponni ditemukan lebih sensitif terhadap mutagen daripada BPT 5204. Warman *et al.*, (2016), dalam penelitiannya melaporkan nilai LD<sub>50</sub> padi beras hitam lokal Sumatera Barat berkisar dari 300-340 Gy yang dianalisis berdasarkan tinggi bibit dan panjang akar.

Berdasarkan hasil penelitian Lee *et al.*, (2019) nilai LD<sub>50</sub> dengan menganalisis tingkat kelangsungan hidup, dan pertumbuhan bibit berumur empat minggu masing-masing adalah 250 Gy dan 300 Gy. Suliartini *et al.*, (2020), melaporkan nilai LD<sub>50</sub> ditentukan berdasarkan jumlah benih tumbuh pada keempat genotipe padi G10, G16, Baas Selem, dan Inpago Unram-1 masing-masing adalah 264 Gy, 398 Gy, 316 Gy dan 518 Gy. Naibaho *et al.*, (2021), nilai LD<sub>50</sub> dari persentase kecambah kultivar padi Sidikalang adalah 586.446 Gy. Khannetah *et al.*, (2021), Berdasarkan hasil penelitian, nilai LD<sub>50</sub> varietas padi yang diberi perlakuan sinar gamma CR1009 adalah 152.52 Gy, dan nilai LD<sub>50</sub> untuk varietas CR1009 sub1 adalah 284.77 Gy.

Variasi nilai LD<sub>50</sub> untuk genotipe berbeda dari spesies yang sama merupakan pengamatan umum dalam studi mutasi tergantung pada bahan biologis, ukuran, kematangan, kekerasan, dan kadar airnya pada saat perlakuan (Ramchander *et al.*, 2015). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kisaran dosis yang berada di bawah LD<sub>50</sub> dapat diambil sebagai kisaran perlakuan standar dalam pemuliaan mutasi untuk mengubah sifat guna meningkatkan keberadaan mutan yang menguntungkan dalam populasi

mutasi. Berdasarkan hasil penelitian didapat dosis optimal untuk mutagenesis Madang Pulau, Putih Papanai dan Banang Kuniang pada dosis 200 dan 300 Gy, untuk menghasilkan mutan yang layak dan mempertahankan populasi untuk pemuliaan mutasi.

## KESIMPULAN

Persentase perkecambahan tertinggi terdapat pada kontrol (0 Gy) pada dua genotype. Genotipe Madang Pulau sebesar 85.67%, dan genotipe Banang Kuniang sebesar 73%. Berbeda halnya dengan genotipe Putih Papanai dosis 100, 200, dan 300 Gy (97%, 95% dan 90%) dapat meningkatkan persentase kecambah jika dibandingkan dengan kontrol (87%) dan pada dosis 400 Gy terjadi penurunan persentase kecambah secara signifikan untuk ketiga genotype. Bibit tertinggi pada ketiga genotipe terdapat pada dosis 0 Gy dengan nilai sebesar 27.79 cm pada genotipe Madang Pulau, 27.56 cm genotipe Putih Papanai, dan 26.99 cm pada genotipe Banang Kuniang. Tinggi bibit pada ketiga genotipe generasi M<sub>0</sub> mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya dosis iradiasi. Genotipe Putih Papanai memiliki pembentukan bibit yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan Madang Pulau dan Banang Kuniang pada dosis 500 Gy, ini menunjukkan bahwa genotipe Banang Kuniang lebih toleran terhadap radiasi sinar gamma. Peningkatan dosis radiasi gamma ini telah mempengaruhi perkembangan akar, yang tidak mampu tumbuh maksimal dibandingkan dengan kontrol. Panjang akar tertinggi pada genotipe Madang Pulau terdapat pada dosis 0 Gy sebesar 5.34 cm dan berbeda nyata dengan perlakuan dosis iradiasi lainnya. Pada genotype Putih Papanai, panjang akar tertinggi terdapat pada dosis 0 Gy sebesar 6.26 cm dan berbeda nyata dengan perlakuan dosis iradiasi 300, 400 dan 500 Gy. Pada genotype Banang Kuniang, panjang akar tertinggi terdapat pada dosis 0 Gy sebesar 5.23 cm dan berbeda nyata dengan perlakuan dosis iradiasi 300, 400 dan 500 Gy. Panjang akar dengan nilai terendah terdapat pada dosis

500 Gy pada kedua genotype. Nilai LD50 dalam penelitian ini ditentukan dari persentase perkecambahan dari masing-masing genotype. Nilai LD50 genotype Madang Pulau, Putih Papanai, dan Banang Kuniang masing-masing adalah 333.58 Gy, 377.62 Gy, dan 291.14 Gy. Kemampuan tumbuh mutan padi lokal "Puputih Papanai" lebih tinggi dibandingkan dengan Madang Pulau tetapi lebih rendah dari Banang Kuniang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [ISTA] **International Seed Testing Association. 2007.** *International Rules for Seed Testing* (Basserdorf). Switzerland.
- Abdel-Hady, M. S., Okasha, E. M., Soliman, S. S. A., & Talaat, M. 2008.** Effect of Gamma Radiation and Gibberellic Acid on Germination and Alkaloid Production in *Atropa belladonna* L. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2(3), 401–405.
- 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>
- Ahloowalia, B. S., Maluszynski, M., & Nichterlein, K. 2004.** Global impact of mutation-derived varieties. *Euphytica*, 135 (2), 187–204. <https://doi.org/10.1023/B:EUPH.0000014914.85465.4f>
- Al-Mamari, A.G. H. K., & Ghanim, A. M. A. 2018.** Mutation Induction For Sorghum And Rice Using Gamma and X-Ray Radiations. In *Plant Mutation Breeding and Biotechnology* (hal. 139). IAEA-CN-263-256.
- Ayneband, A., & Afsharinafar, K. 2012.** Effect of gamma irradiation on germination characters of amaranth seeds. *European Journal of Experimental Biology*, 2(4), 995–999.
- Baldwin, J., & Grantham, V. 2015.** Radiation hormesis: Historical and current perspectives. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 43(4), 242–246. <https://doi.org/10.2967/jnmt.115.166074>
- Çelik, Ö., & Atak, Ç. 2016.** Applications of Ionizing Radiation in Mutation Breeding. *Intech*, 11, 111–132.
- Chaudhuri, S. K. 2002.** A simple and reliable method to detect gamma irradiated lentil (*Lens culinaris* Medik.) seeds by germination efficiency and seedling growth test. *Radiation Physics and Chemistry*, 64(2), 131–136. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00467-4](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00467-4)
- Crouthamel, C. E. 1975.** *Applied Gamma-Ray Spectrometry* (Second Edi). Oxford: Pergamon Pres. <https://doi.org/10.13182/nse61-a25919>
- De Micco, V., Arena, C., Pignalosa, D., & Durante, M. 2011.** Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants. *Radiation and Environmental Biophysics*, 50(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0343-8>
- Efendi, Bakhtiar, Zuyasna, Alamsyah, W., Syamsuddin, Zakaria, S., ... Sobrizal. 2017.** The Effect of Gamma Ray Irradiation on Seed Viability and Plant Growth of Aceh's Local Rice (*Oryza sativa* L.). *Advances in Natural and Applied Sciences*, 11(3), 91–96.
- El-Degwy, I. S. 2013.** Mutation Induced Genetic Variability in Rice (*Oryza sativa* L.). *Egyptian Journal of Agronomy*, 35(2), 199–209. <https://doi.org/10.21608/agro.2013.87>
- Gaul, H. 1970.** *Mutagen effects observable in the first generation* (Manual on). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- 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>
- Haris, A., Abdullah, Bakhtiar, Subaedah, Aminah, & Jusoff, K. 2013.** Gamma ray radiation mutant rice on local aged dwarf. *Middle East Journal of Scientific Research*, 15(8), 1160–1164. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.15.8.11541>
- Hong, M. J., Kim, D. Y., Ahn, J. W., Kang, S. Y., Seo, Y. W., & Kim, J. B. 2018.** Comparison of radiosensitivity response to acute and chronic gamma irradiation in colored wheat. *Genetics and Molecular Biology*, 41(3), 611–623. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2017-0189>
- Jaipo, N., Kosiwikul, M., Panpuang, N., & Prakrajang, K. 2019.** Low dose gamma radiation effects on seed germination and seedling growth of cucumber and okra. *Journal of Physics: Conference Series*, 1380, 1–5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012106>
- Jan, S., Parween, T., Siddiqi, T. O., & Mahmooduzzafar, X. 2012.** Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews*, 20(1), 17–39. <https://doi.org/10.1139/a11-021>
- Jankowicz-Cieslak, J., Tai, T. H., Kumlehn, J., & Till, B. J. 2017.** *Biotechnologies for plant mutation breeding*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Kadhimi, A. A., Zain, C. R. C. M., Alhasnawi, A. N., Isahak, A., Ashraf, M. F., Mohamad, A., ... Yusoff, W. M. W. 2016.** Effect of irradiation and polyethylene glycol on drought tolerance of MR269 genotype rice (*Oryza sativa* L.). *Asian Journal of Crop Science*, 8(2), 52–59. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2016.52.59>
- Khannetah, K., Pushpam, R., Ganesan, K., KK Kumar, Pillai, C., Chandrashekar, & Arumugam, M. 2021.** Appraising LD50 dosage for physical mutagen (Gamma rays) in CR1009 and CR1009 sub1 rice varieties. *Journal of ...*, 10(1), 2715–2719.
- Kodym, A., & Afza, R. 2003.** *Physical and chemical mutagenesis. Methods in molecular biology* (Vol. 236). <https://doi.org/10.1385/1-59259-413-1:189>
- Kuzin, A. M., Vagabova, M. E., & Revin, A. F. 1976.** Molecular mechanisms of ionizing radiation stimulating effect on seeds. Activation of RNA synthesis. *Radiobiologiya*, 16(2), 259–261. <https://doi.org/https://doi.org/>
- Lagoda, P. 2012.** *Effects of radiation on living cells and plants*. (B. P. and In Shu, Q.Y., Forster & H. Nakagawa, Ed.) (Plant Muta). UK: CABI.
- Lee, S.-I., Park, J.-W., Kim, J.-B., Kang, S.-Y., Choi, H.-I., & Han, S.-M. 2019.** Evaluation of Radiosensitivity of Rice (*Oryza sativa* L) Seeds Exposed to Proton Beams and Gamma Rays and Investigation of Optimal Doses for Mutation Induction. *Journal of Radiation Industry*, 13(3), 173–782.
- Marcu, D., Damian, G., Cosma, C., & Cristea, V. 2013.** Gamma radiation effects on seed germination, growth and pigment content, and ESR study of induced free radicals in maize (*Zea mays*). *Journal of Biological Physics*, 39(4), 625–634. <https://doi.org/10.1007/s10867-013-9322->
- Naibaho, D., Purba, E., Hanafiah, D. S., &**

- Hasibuan, S. 2021.** Radiosensitivity and effect of gamma ray irradiation on upland rice CV. Sidikalang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 782(3), 4–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/782/3/032068>
- Pradhan, B., Baral, S., Patra, S., Behera, C., Nayak, R., MubarakAli, D., & Jena, M. 2020.** Delineation of gamma irradiation (60Co) induced oxidative stress by decrypting antioxidants and biochemical responses of microalga, *Chlorella* sp. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 25(April), 101595. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101595>
- Ramchander, S., Ushakumari, R., & Pillai, M. R. 2015.** Lethal dose fixation and sensitivity of rice varieties to gamma radiation. *Indian Journal of Agricultural Research* 2015, 49(1), 24–31.
- Riviello-Flores, M. de la L., Cadena-Iñiguez, J., Ruiz-Posadas, L. del M., Arévalo-Galarza, M. de L., Castillo-Juárez, I., Hernández, M. S., & Castillo-Martínez, C. R. 2022.** Use of Gamma Radiation for the Genetic Improvement of Underutilized Plant Varieties. *Plants*, 11(1161), 1–19.
- 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
- Shu, Q. Y., B.P.Forster, & Nakagawa, H. 2012.** *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. (Q. Y. Shu, B.P.Forster, & H.Nakagawa, Ed.). London, UK: CAB International.
- Sparrow, A. H. 1961.** *Types of ionizing radiations and their cytogenetic effects* (Mutation a). NAS-NRC.
- Suliantini, N. W. S., Wangiyana, W., Aryana, I. G. P. M., & Sudharmawan, A. A. K. 2020.** Radiosensitivity and Seedling Growth of Several Genotypes of Paddy Rice Mutants Irradiated with Gamma Rays at Different Doses. *International journal of Horticulture, Agriculture and Food science*, 4(6), 242–247. <https://doi.org/10.22161/ijhaf.4.5.5>
- Tabasum, A., Cheema, A. A., Hameed, A., Rashid, M., & Ashraf, M. 2011.** Radio sensitivity of rice genotypes to gamma radiations based on seedling traits and physiological indices. *Pakistan Journal of Botany*, 43(2), 1211–1222.
- Tatar, I., Shamsiah, A., & Rahim, H. A. 2020.** In vitro screening of gamma irradiated rice variety MR263 for drought tolerance using polyethylene glycol. *Food Research*, 4(5), 11–20. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(S5\).008](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(S5).008)
- Untari, Y., Efendi, & Sabaruddin. 2021.** Effect Of Gamma Ray Irradiation And Harvesting Age On Viability And Vigor Of M2 Mutant Rice ( *Oryza Sativa* L ) Seeds. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 14(3), 49–53. <https://doi.org/10.9790/2380-140302495>
- USDA. 2023.** *World agricultural production. Global Market Analysis*. WAP 3-23. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.201907059>
- Volkova, P. Y., Bondarenko, E. V., & Kazakova, E. A. 2022.** Radiation hormesis in plants. *Current Opinion in Toxicology*, 30.
- Warman, B., Sobrizal, S., Suliansyah, I., Swasti, E., & Syarif, A. 2016.** Perbaikan Genetik Kultivar Padi Beras Hitam Lokal Sumatera Barat Melalui Mutasi Induksi. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 11(2), 125. <https://doi.org/10.17146/jair.2015.11.2.2791>
- Ye, C., Li, X., Redoña, E., Ishimaru, T., & Jagadish, K. 2021.** *Rice Improvement: Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives*. Rice Improvement. Switzerland: Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66530-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66530-2_7)