

RESPON MORFOLOGI DAN PARAMETER GENETIK KARAKTER BIOMASSA SORGUM LOKAL INDONESIA INDUKSI RADIASI SINAR GAMMA

MORPHOLOGICAL AND GENETIC PARAMETERS OF BIOMASS TRAITS OF LOCAL INDONESIAN SORGHUM INDUCED BY GAMMA IRRADIATION

Yuniel Melvanolo Zendrato*, Theresa Dwi Kurnia

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian dan Bisnis, Universitas Kristen Satya
Wacana, Jalan Diponegoro no. 66, Kota Salatiga 50711, Jawa Tengah, Indonesia

*Korespondensi: yuniel.zendrato@uksw.edu

Diterima: 22 Agustus 2025 / Direvisi: 27 September 2025/ Disetujui: 16 Desember 2025

ABSTRAK

Pengembangan program diversifikasi diperlukan untuk menjawab permasalahan pangan dan bioenergi di Indonesia. Tanaman sorgum lokal dapat menjadi alternatif komoditas strategis untuk menjawab tantangan ini, dengan mengkaji kajian keragaman genetik dan potensinya. Pemuliaan mutasi dengan iradiasi sinar gamma dapat meningkatkan keragaman tanaman sorgum yang diarahkan untuk seleksi kandidat unggul. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respon morfologi dan parameter genetik karakter biomassa sorgum lokal Indonesia yang diinduksi melalui iradiasi gamma. Tujuh varietas sorgum Indonesia diiradiasi dengan sinar gamma (0, 100, 200, 300, 400, dan 500 Gy) dan ditanam pada kondisi lingkungan suhu berkisar 23-28°C, curah hujan 3316 mm per tahun, dan pH tanah 5,8. Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan kelompok lengkap teracak (RKLT) dengan tiga ulangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat peningkatan keragaman genetik varietas lokal sorgum yang diindikasikan dengan interaksi antara varietas dan dosis sinar gamma yang signifikan ($p\text{-value} < 0,001$) pada beberapa karakter pengamatan. Karakter biomassa memiliki korelasi positif dengan tinggi tanaman ($r=0,92$) dan karakter lain seperti diameter batang, karakter daun, dan brix. Tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang dan brix memiliki heritabilitas $>0,87$ dan kemajuan genetik persentase rata-rata yang tinggi (GAM) $>27,83$) sehingga karakter ini dijadikan karakter seleksi untuk biomassa sorgum. Ada 10 genotipe sorgum yang diseleksi berdasarkan indeks seleksi yang mengarah ke biomassa sorgum, yaitu S1R2, S1R1, S7R2, S6R0, S6R4, S6R5, S6R2, S2R0, S4R3, dan S1R0. Genotipe ini dapat digunakan sebagai materi genetik untuk program pemuliaan sorgum sebagai bioenergi masa depan di Indonesia.

Kata kunci: Biomassa, Iradiasi gamma, Keragaman Genetik, Seleksi, Sorgum Lokal

ABSTRACT

The development of diversification programs is necessary to address food and bioenergy issues in Indonesia. Local sorghum can be used as strategic commodity alternative to address these challenges by examining genetic diversity and potential. Mutant breeding using gamma irradiation can increase the diversity of sorghum for the selection of superior candidates. This study aimed to evaluate the morphological response and genetic parameters of biomass

characteristics of local Indonesian sorghum induced by gamma irradiation. Seven Indonesian sorghum varieties were irradiated with gamma rays (0, 100, 200, 300, 400, and 500 Gy) and planted in environmental conditions with temperatures ranging from 23 to 28 °C, annual rainfall of 3316 mm, and soil pH of 5.8, using a randomized complete block design (RCBD) with three replicates. The results showed an increase in the genetic diversity of local sorghum varieties, as indicated by a significant interaction between variety and gamma ray dose (p -value < 0.001) in several observed traits. Biomass traits had a significant positive correlation with plant height ($r=0.92$) and other traits such as stem diameter, leaf traits, and brix. Plant height, number of leaves, stem diameter, and brix had high heritability (>0.87) and genetic advance per mean (GAM, >27.83), making these traits are suitable for selection for sorghum biomass. There are 10 sorghum genotypes selected based on selection indices that lead to sorghum biomass, namely S1R2, S6R0, S1R1, S7R2, S6R4, S6R5, S6R2, S2R0, S4R3, and S7R1. These genotypes can be used as genetic material for sorghum breeding programs for future bioenergy in Indonesia.

Keywords: Biomass, Gamma Irradiation, Genetic Diversity, Local Sorghum, Selection

PENDAHULUAN

Sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) merupakan salah satu tanaman serealia penting yang dibudidayakan secara global dan memiliki peranan strategis sebagai sumber pangan, pakan ternak, dan bahan baku bioenergy. Tanaman ini diminati secara global karena nilai ekonominya yang tinggi, kandungan gizi yang baik, serta kemampuan beradaptasi pada kondisi semi-kering maupun iklim tropis dan subtropic (Kumari *et al.*, 2025). Kondisi tersebut menjadikan sorghum salah satu komoditas yang relevan dalam menghadapi isu perubahan iklim dan kebutuhan pangan berkelanjutan.

Beberapa wilayah di Indonesia, seperti Jawa, Nusa Tenggara Timur (NTT), dan sebagian Sulawesi telah membudidayakan sorghum untuk memenuhi kebutuhan makanan lokal maupun pakan ternak (Mustikawati *et al.*, 2024). Meskipun sorghum telah diakui sebagai tanaman potensial untuk pangan, pakan, dan energi, pengembangan varietas unggul di Indonesia belum setara dengan komoditas pangan utama lainnya. Seiring meningkatnya urgensi diversifikasi pangan nasional dan pengembangan sumber energi terbarukan,

penguatan pemuliaan sorghum menjadi kebutuhan mendesak.

Pemuliaan tanaman sorghum bertujuan untuk meningkatkan keragaman genetik guna memperoleh varietas unggul yang produktif dan adaptif (Maftuchah *et al.*, 2021; Xin *et al.*, 2021). Salah satu pendekatan yang telah terbukti efektif adalah teknik pemuliaan mutasi melalui pemaparan benih terhadap radiasi gamma (Murtiyaningsih *et al.*, 2023; Sihono *et al.*, 2023). Induksi mutasi mampu menghasilkan perubahan pada susunan genetik yang memunculkan variasi fenotipik lebih luas dibandingkan populasi awal pada sorghum. Radiasi gamma dapat memengaruhi berbagai karakter morfologi seperti tinggi tanaman, ukuran daun, jumlah anakan, umur berbunga, panjang malai, dan hasil biji sehingga menjadi sumber keragaman baru yang potensial untuk dimanfaatkan dalam seleksi (Anisiyah *et al.*, 2025; Kiani *et al.*, 2022).

Respons tanaman terhadap radiasi bergantung pada dosis; dosis moderat dapat meningkatkan keragaman, sedangkan dosis tinggi dapat menghambat pertumbuhan atau mengurangi viabilitas (Kiani *et al.*, 2022; Qosim *et al.*, 2024). Pengamatan respon

morfologi pada populasi mutan menjadi langkah awal untuk mengevaluasi dampak radiasi gamma terhadap penampilan tanaman. Evaluasi morfologi perlu dilengkapi dengan parameter genetik seperti koefisien keragaman genetik, heritabilitas, dan kemajuan genetik untuk menentukan karakter yang benar-benar potensial untuk diseleksi (Dare *et al.*, 2024; Pratama *et al.*, 2024).

Keragaman genetik yang tinggi akan memperbesar peluang untuk mendapatkan individu yang memiliki sifat yang diinginkan, seiring dengan heritabilitas yang tinggi pada karakter seleksi, yang menunjukkan bahwa kendali faktor genetik lebih besar sehingga lebih responsif terhadap seleksi (Muazam *et al.*, 2024; Nazli *et al.*, 2024; Sharif *et al.*, 2024).

Penelitian ini berkontribusi dengan menyediakan analisis terintegrasi antara keragaan morfologi dan parameter genetik untuk mengidentifikasi genotipe mutan sorgum berpotensi biomassa tinggi, sehingga memperkuat dasar ilmiah bagi program pemuliaan sorgum nasional. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi respon morfologi populasi mutan sorgum yang diiradiasi gamma, mengestimasi parameter genetik untuk menyeleksi genotipe yang berpotensi menghasilkan biomassa tinggi.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Kebun Percobaan Kartini, Fakultas Pertanian dan Bisnis, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga dengan ketinggian tempat 550 m di atas permukaan laut (mdpl), pada bulan Juli sampai dengan Desember 2024. Lokasi percobaan memiliki suhu berkisar 23-28 °C, curah hujan 3316 mm per tahun, dengan pH

tanah 5,8. Bahan dan alat yang digunakan adalah materi genetik sorgum, pupuk kandang, pupuk N, P, dan K, dolomit, meteran, dan alat-alat pertanian konvensional. Bahan genetik yang digunakan adalah tujuh varietas sorgum lokal asal Sumba Timur, Nusa Tenggara Timur Indonesia, yaitu WH Rara Tadda (S1), WH Miting Wala (S2), WH Miting Nggangga (S3), WH Rara Kaditta (S4), WH Miting Tadda (S5), WH Manipa Tadda (S6), dan WH Kiku Mbimbi (S7). Setiap varietas diberi perlakuan iradiasi gamma dengan dosis 100, 200, 300, 400, dan 500 Gy. Dosis iradiasi yang bervariasi dapat memberi keragaman genetik tanaman sorgum dengan batas dosis pertumbuhan optimal adalah dosis 500 Gy (Tri Anggraini *et al.*, 2023). Iradiasi dilakukan di Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR)-BATAN. Sebanyak 42 genotipe satuan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 35 genotipe hasil radiasi dan 7 genotipe lokal sorgum tanpa radiasi sebagai kontrol.

Penelitian percobaan menggunakan rancangan acak kelompok lengkap (RAK) faktorial dengan tiga kali ulangan. Jarak tanam 70 cm antar barisan dan 15 cm dalam barisan. Setiap satuan percobaan ditanam pada dua baris dengan panjang dua meter. Pemberian pupuk kandang dan dolomit dilakukan sebelum tanam dengan dosis masing-masing 10 t ha⁻¹ dan 1 t ha⁻¹. Pupuk dilakukan dua kali, pada 10 hari setelah tanam (HST) menggunakan urea dengan dosis 150 kg ha⁻¹, SP36 200 kg ha⁻¹, KCl 100 kg ha⁻¹, dan pada 30-35 HST dengan hanya menggunakan urea dosis 150 kg ha⁻¹. Pengelolaan tanaman meliputi penyiangan gulma, pengairan, pengendalian hama, pengendalian penyakit sesuai dengan teknis budidaya tanaman sorgum.

Lima sampel tanaman yang dikumpulkan untuk setiap genotipe dipilih secara acak untuk data fenotipik. Karakter pengamatan terdiri dari hari pembungaan (dihitung setelah 50% genotipe berbunga); tinggi tanaman (cm, diukur sebagai jarak dari tanah ke permukaan hingga buku yang memuat daun bunga); diameter batang (mm, diukur pada buku pertama); panjang dan lebar daun (cm, diukur menggunakan daun di bagian tengah batang); jumlah daun; jumlah anakan, jumlah ruas batang, sudut daun, brix (%), kandungan klorofil menggunakan SPAD, dan biomassa segar (g, dihitung dengan menimbang bobot semua bagian tanaman yang dipanen termasuk batang, daun dan malai). Karakter hasil diamati namun tidak dijadikan data penelitian karena beberapa genotipe dengan perlakuan sinar gamma dosis tinggi tidak menghasilkan malai dan biji.

Data dianalisis dengan analisis ragam 5% dan secara deskriptif untuk melihat respon morfologi. Analisis lanjut berupa analisis korelasi, komponen ragam, heritabilitas dan kemajuan genetik. Indeks seleksi digunakan

untuk pemilihan genotipe terbaik hasil radiasi dengan menggunakan empat karakter untuk target biomassa, yaitu: diameter batang, jumlah daun, tinggi tanaman, brix dan biomassa segar. Semua karakter diboboti satu dan memiliki arah seleksi positif. Microsoft Excel digunakan untuk perhitungan indeks seleksi sementara analisis statistik lainnya menggunakan RStudio (versi 4.4.3) dengan *package* “agricolae” dan “metan”.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis ragam dan performa tiap karakter

Hasil analisis ragam (Tabel 1) menunjukkan bahwa varietas lokal sorgum memberikan pengaruh sangat nyata ($p < 0,001$) terhadap seluruh karakter morfologi yang diamati. Hal ini mengindikasikan adanya keragaman genetik yang tinggi di antara varietas lokal yang digunakan sehingga dapat menjadi landasan penting dalam program pemuliaan untuk menghasilkan galur unggul (Maftuchah *et al.*, 2021).

Tabel 1. Analisis ragam varietas, dosis Gy, dan interaksinya terhadap karakter pengamatan

Karakter	Varietas (A)	Dosis Gy (B)	A vs. B	KK (%)
Tinggi tanaman (cm)	<0,001	<0,001	0,028	14,07
Panjang daun (cm)	<0,001	0,795	0,241	8,30
Lebar daun (cm)	<0,001	0,014	0,714	13,67
Diameter batang (mm)	<0,001	0,002	<0,001	12,63
Jumlah anakan	<0,001	0,869	<0,001	14,42
Jumlah daun	<0,001	<0,001	0,012	11,50
Jumlah buku	<0,001	0,001	0,491	15,05
Waktu pembungaan	<0,001	<0,001	0,001	2,08
Sudut daun	<0,001	<0,001	<0,001	4,46
Klorofil (SPAD)	<0,001	<0,001	<0,001	3,67
Brix (%)	<0,001	0,001	<0,001	4,20
Biomassa (gr)	<0,001	0,283	<0,001	9,92

Keterangan: KK, koefisien keragaman.

Dosis radiasi gamma juga berpengaruh signifikan terhadap sebagian besar karakter, seperti tinggi tanaman, lebar daun, diameter batang, jumlah daun, jumlah buku, sudut daun, kadar klorofil, dan kadar brix. Hal ini menunjukkan bahwa mutasi induksi dapat mengubah sifat morfologi tanaman secara nyata (Singh *et al.*, 2024). Selain itu, terdapat interaksi signifikan antara varietas dan dosis (A × B) pada beberapa karakter, terlebih karakter biomassa, yang mencerminkan bahwa respon terhadap mutasi sangat tergantung pada latar belakang genetik masing-masing varietas yang digunakan (Anisiyah *et al.*, 2025). Koefisien keragaman (KK) untuk seluruh karakter berkisar antara 2,08% (waktu berbunga) hingga 15,05% (jumlah buku), yang mengindikasikan adanya kestabilan pengukuran dan kualitas data yang baik.

Tinggi tanaman menunjukkan keragaman yang sangat luas, mulai dari 93-330 cm, dengan rata-rata 210,8 cm dan simpangan baku (SD) sebesar 46,82 cm (Tabel 2). Genotipe dengan tinggi tanaman sedang hingga pendek dapat diprioritaskan untuk sistem tanam intensif dan tahan rebah, sedangkan yang tinggi cocok untuk produksi biomassa (Wirnas *et al.*, 2021). Diameter batang berkisar antara 11 mm hingga 55 mm dengan rata-rata 35,44 mm, juga menunjukkan keragaman fenotipik yang luas. Karakter ini penting untuk menopang tanaman dan mendukung akumulasi biomassa, serta memiliki asosiasi positif terhadap kekuatan batang dan transportasi air (Takanashi, 2023). Dalam studi ini, biomassa segar tanaman sorgum hasil iradiasi berkisar 550,67 g sampai 877,67 g.

Tabel 2. Deskripsi statistik karakter pengamatan genotipe sorgum

Karakter	Min	Max	Rataan	SD	LSD
Tinggi tanaman (cm)	93,00	330,00	210,80	46,82	48,18
Panjang daun (cm)	55,00	120,00	100,10	7,10	13,50
Lebar daun (cm)	4,50	12,00	8,64	0,96	1,92
Diameter batang (mm)	11,00	55,00	35,44	7,85	6,90
Jumlah anakan	0,00	9,00	2,92	0,96	2,23
Jumlah daun	5,00	16,00	10,07	2,16	1,88
Jumlah buku	3,00	10,00	6,75	0,89	1,65
Waktu pembungaan	54,00	85,00	75,67	6,90	2,56
Sudut daun	19,00	61,00	38,02	10,01	2,75
Klorofil (SPAD)	45,30	90,10	57,30	8,72	3,41
Brix (%)	1,50	8,20	3,95	1,65	0,56
Biomassa (gr)	550,67	877,67	728,81	110,24	117,48

Keterangan: SD, standar deviasi; LSD, *least significant difference*

Panjang daun bervariasi dari 55 cm hingga 120 cm dengan rata-rata 100,1 cm, sementara lebar daun berkisar antara 4,5 cm hingga 12,0 cm. Variasi ukuran daun menunjukkan kapasitas penyesuaian genotipe terhadap efisiensi penangkapan

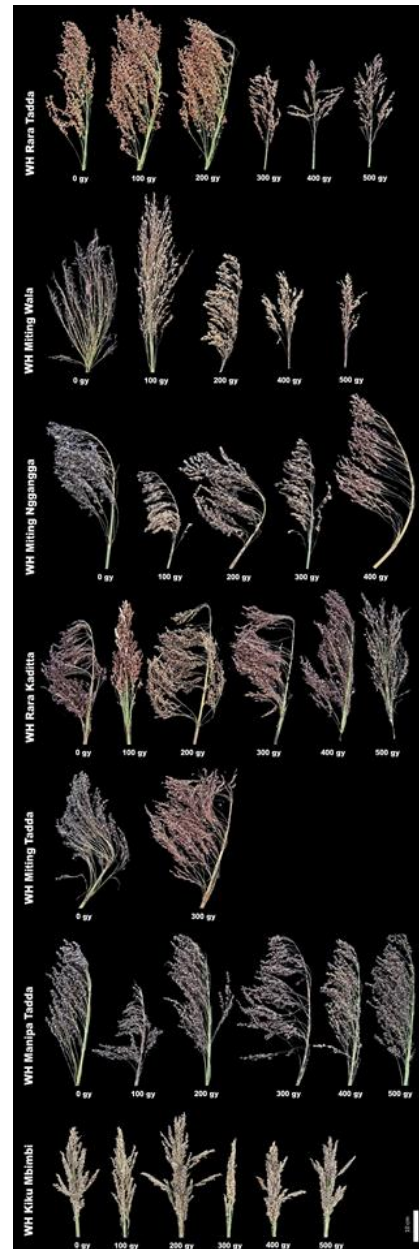
cahaya. Sementara itu, sudut daun berkisar antara 19° hingga 61°, yang memengaruhi distribusi cahaya antar kanopi. Sudut daun sempit mendukung penetrasi cahaya ke lapisan bawah dan berkontribusi terhadap efisiensi fotosintesis pada populasi tinggi

(Mantilla-Perez & Salas Fernandez, 2017). Nilai SPAD (klorofil) berkisar antara 45,3 hingga 90,1, dengan rata-rata 57,3. Kandungan klorofil tinggi mencerminkan kapasitas fotosintetik yang tinggi dan dapat menjadi indikator seleksi tidak langsung terhadap vigor tanaman. Kadar brix menunjukkan kisaran yang cukup luas, yaitu 1,5% hingga 8,2%, dengan rata-rata 3,95%. Variasi ini penting untuk pengembangan sorgum manis atau bioethanol untuk industry di Indonesia, di mana kandungan brix yang tinggi merupakan salah satu indikator utama (Wirawan *et al.*, 2024; Wirnas *et al.*, 2021). Perbedaan signifikan antar genotipe dalam karakter ini memberikan peluang untuk seleksi genotipe unggul dengan kandungan gula tinggi.

Penampilan malai sorgum lokal yang telah diradiasi ditunjukkan pada Gambar 1. Beberapa genotipe sorgum hasil radiasi tidak menghasilkan malai pada masa pertumbuhannya, seperti S2R3 (WH Mining Wala dosis radiasi 300 Gy); S3R5 (WH Mining Nggangga dosis radiasi 500 Gy); S5R1, S5R2, S5R4 dan S5R5 (WH Mining Tada dosis radiasi 100 Gy, 200 Gy, 400 Gy dan 500 Gy). Semakin tinggi dosis radiasi juga memberikan performa malai yang kurang baik seperti ditunjukan pada S1 dan S2 pada dosis 400 Gy dan 500 Gy.

Program pemuliaan sorgum ke depan tentu akan memperhatikan genotipe yang menghasilkan malai dan biji untuk ditanam pada generasi selanjutnya. Secara umum, dosis radiasi rendah (100, 200, dan 300 Gy) dapat memberikan penampilan malai yang baik; namun dosis tinggi (di atas 400 Gy) berisiko terhadap kematian tanaman yang disebabkan oleh kerusakan DNA dan gangguan metabolisme akibat paparan radiasi (Qosim *et al.*, 2024). Penelitian lain menunjukkan peningkatan dosis iradiasi

gamma dapat menyebabkan penurunan berat segar dan kering akar dan batang, panjang akar dan batang, hingga terganggunya pembentukan malai (Hong *et al.*, 2022; Kiani *et al.*, 2022).



Gambar 1. Penampilan malai sorgum lokal berdasarkan hasil iradiasi

Korelasi antar karakter pengamatan

Analisis korelasi antar karakter agronomi menunjukkan hubungan yang

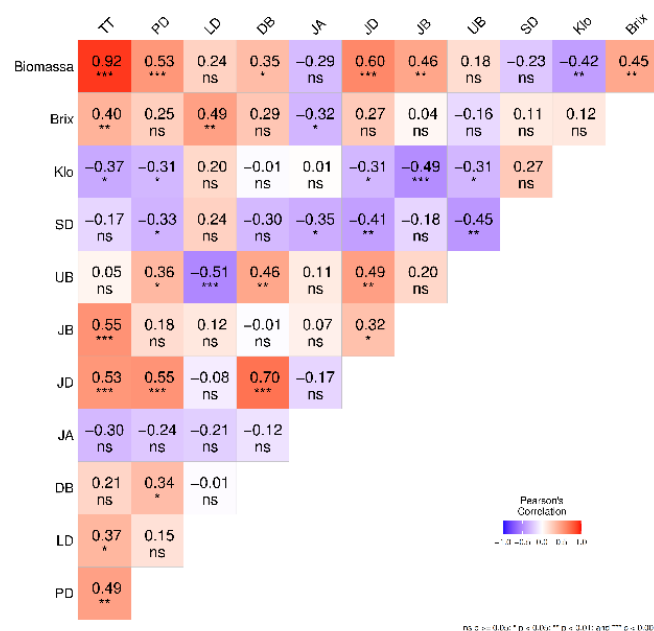
beragam, baik positif maupun negatif, di antara variabel morfologi yang diamati (Gambar 2). Nilai korelasi ini menggambarkan sejauh mana perubahan satu karakter akan diikuti oleh perubahan karakter lain, yang menjadi dasar penting dalam seleksi varietas unggul sorgum. Dalam seleksi biomassa sorgum, korelasi antar karakter penting seperti tinggi tanaman, diameter batang, karakter daun hingga brix terhadap karakter biomassa, perlu dikaji lanjut untuk dijadikan karakter seleksi (Dare *et al.*, 2024; Pratama *et al.*, 2024).

Tinggi tanaman dan sudut daun berkorelasi negatif yang menunjukkan bahwa genotipe dengan daun yang lebih tegak cenderung memiliki batang yang lebih tinggi. Fenomena ini sangat penting dalam pengembangan ideotipe sorgum modern, karena sudut daun yang sempit (tegak) memungkinkan penetrasi cahaya yang lebih baik ke bagian bawah kanopi, sehingga mendukung kepadatan tanam yang lebih tinggi. Arsitektur daun menjadi salah satu target penting dalam pemuliaan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan cahaya pada sistem pertanian intensif (Carbajal-Friedrich & Burgess, 2024; Mantilla-Perez & Salas Fernandez, 2017).

Tinggi tanaman berkorelasi positif signifikan terhadap jumlah daun, panjang dan lebar daun, dan jumlah buku. Hal ini mengindikasikan bahwa genotipe dengan batang yang lebih tinggi cenderung memiliki

lebih banyak daun dan ruas. Tinggi tanaman mempunyai korelasi signifikan dengan brix yang menjadi karakter biomassa. Sorgum tidak harus tinggi untuk mengakumulasi gula dan hubungan tersebut kemungkinan besar merupakan hasil seleksi untuk total hasil gula (Shukla *et al.*, 2017). Dalam penelitian ini, karakter brix hanya berkorelasi dengan tinggi tanaman dan lebar daun. Karakter biomassa yang menjadi karakter penting dalam penelitian ini memiliki korelasi positif dan signifikan dengan karakter tinggi tanaman (0,92), panjang daun (0,53), diameter batang (0,35), jumlah daun dan buku (0,60 dan 0,46), dan karakter brix (0,45). Penelitian lain memberi informasi bahwa nilai korelasi karakter-karakter di atas dengan biomassa sorgum (Pratama *et al.*, 2024; Sulistyowati *et al.*, 2022). Karakter-karakter ini dapat digunakan sebagai karakter seleksi untuk memilih genotipe sorgum secara langsung.

Beberapa karakter memiliki korelasi negatif dengan karakter biomassa seperti jumlah anakan, sudut daun dan klorofil. Karakter yang tidak memiliki korelasi positif dan nyata terhadap karakter utama biomassa tidak dapat dijadikan sebagai karakter seleksi, namun melalui seleksi tidak langsung dengan menggunakan karakter lainnya (Sulistyowati *et al.*, 2022).



Keterangan: TT, tinggi tanaman; PD, panjang daun; LD, lebar daun; DB, diameter batang; JA, jumlah anakan; JD, jumlah daun; JB, jumlah buku; UB, umur pembungaan; SD, sudut daun; Klor, Klorofil (SPAD).

Gambar 2. Korelasi antar karakter pengamatan

Nilai ragam genetik dan heritabilitas

Salah satu syarat utama dalam program pemuliaan tanaman adalah tersedianya variabilitas genetik yang cukup luas di antara populasi yang diuji. Dalam studi ini, hasil estimasi keragaman genotipik (KG) dan fenotipik (KF) menunjukkan adanya keragaman yang cukup besar antara kombinasi perlakuan sorgum lokal yang telah diinduksi mutasi sinar gamma (Tabel 3). Karakter tinggi tanaman dan biomassa memiliki nilai KG dan KF yang sangat tinggi, menandakan bahwa variasi antar genotipe cukup mencolok dan karakter-karakter ini potensial untuk diseleksi secara langsung. Sementara itu karakter jumlah anakan dan lebar daun cenderung memiliki nilai yang kecil. Nilai koefisien keragaman genotipik (KKG) dan fenotipik (KKF) juga menunjukkan adanya keragaman yang berbeda antar karakter. Karakter kadar brix, sudut daun, dan diameter batang menunjukkan nilai KKG dan KKF yang tinggi, yaitu masing-masing

KKG = 41,54%, 26,20%, dan 21,45%, serta KKF = 41,85%, 26,33%, dan 22,15%. Ini mengindikasikan bahwa karakter-karakter tersebut memiliki keragaman yang nyata, dan sebagian besar variasinya berasal dari faktor genetik. Perbedaan kecil antara nilai KKG dan KKF pada karakter-karakter tersebut menunjukkan bahwa pengaruh lingkungan terhadap ekspresi fenotip relatif kecil, sehingga seleksi akan efektif dan dapat menghasilkan kemajuan genetik yang nyata (Ngidi *et al.*, 2024; Wardhani & Wirnas, 2024). Heritabilitas (H) adalah proporsi varians genetik terhadap total varians fenotipik dan menjadi indikator penting dalam keberhasilan seleksi. Semua karakter memiliki heritabilitas tinggi, kecuali jumlah anakan, yang menunjukkan bahwa faktor genetik sangat dominan dalam pengendalian karakter tersebut. Dengan demikian, seleksi pada generasi awal sangat memungkinkan untuk menghasilkan genotipe unggul dari

populasi yang diuji (Arif Rahman *et al.*, 2022; Maftuchah *et al.*, 2021; Munthe *et al.*, 2024).

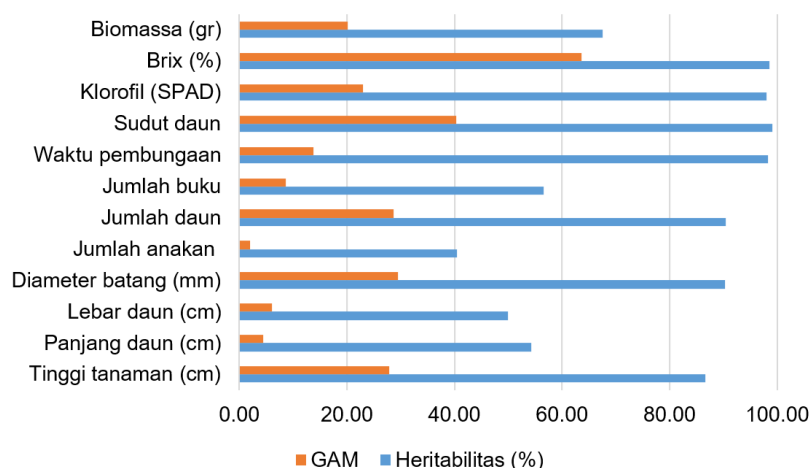
Tabel 3. Estimasi keragaman genetik dan heritabilitas karakter pengamatan

Karakter	KG	KF	KKG (%)	KKF (%)	H	GA	GAM
Tinggi tanaman (cm)	1899,00	2192,27	20,68	22,22	0,87	58,66	27,83
Panjang daun (cm)	27,31	50,35	5,22	7,09	0,54	4,41	4,40
Lebar daun (cm)	0,46	0,93	7,88	11,14	0,50	0,53	6,12
Diameter batang (mm)	55,60	61,62	21,45	22,15	0,90	10,46	29,50
Jumlah anakan	0,01	0,02	3,26	5,12	0,40	0,06	2,05
Jumlah daun	4,22	4,67	20,40	21,46	0,90	2,89	28,67
Jumlah buku	0,45	0,79	9,91	13,18	0,57	0,59	8,71
Waktu pembungaan	46,80	47,62	9,04	9,12	0,98	10,45	13,80
Sudut daun	99,26	100,22	26,20	26,33	0,99	15,33	40,33
Klorofil (SPAD)	74,52	75,99	15,06	15,21	0,98	13,15	22,96
Brix (%)	2,69	2,73	41,54	41,85	0,99	2,51	63,62
Biomassa (gr)	19589,90	29032,93	13,33	23,38	0,68	146,82	20,15

Keterangan: KG, keragaman genetik; KF, keragaman fenotipik; KKG, koefisien keragaman genetik; KKF, koefisien keragaman fenotipik; H, heritabilitas; GA, *genetic advance*/kemajuan genetik; GAM, *genetic advance per percentage of mean*/kemajuan genetik sebagai presentasi rata-rata.

Selain heritabilitas, parameter penting lainnya untuk seleksi adalah kemajuan genetik (GA) dan kemajuan genetik sebagai presentasi rata-rata (GAM). Karakter kadar brix memiliki GAM terbesar (63,62%), menunjukkan potensi kemajuan genetik yang tinggi jika seleksi dilakukan terhadap karakter ini. Hal ini menunjukkan seleksi terhadap kadar brix akan memberikan peningkatan yang substansial terhadap nilai karakter dalam generasi berikutnya, sehingga menjadi target penting dalam perakitan varietas sorgum manis untuk bioetanol maupun pangan (Nazli *et al.*, 2024; Wirawan *et al.*, 2024). Sementara itu, karakter seperti jumlah anakan ($H = 0,40$; $GAM = 2,05\%$) dan lebar daun ($H = 0,50$; $GAM = 6,12\%$) memiliki heritabilitas dan gain genetik yang rendah. Ini menyiratkan bahwa karakter-karakter tersebut dipengaruhi lebih

besar oleh kondisi lingkungan atau memiliki pengendalian genetik yang kompleks. Untuk karakter semacam ini, seleksi tidak langsung atau pengujian lanjut pada lingkungan yang beragam perlu dilakukan agar diperoleh informasi yang lebih akurat terkait stabilitas dan ekspresi genetiknya (Sharif *et al.*, 2024). Beberapa karakter yang memiliki korelasi nyata dan signifikan terhadap karakter biomassa segar memiliki proporsi nilai heritabilitas ($>0,87$) dan GAM ($>27,83$) yang besar, seperti tinggi tanaman, diameter batang, brix dan jumlah daun (Gambar 3). Sementara itu, karakter biomassa sendiri memiliki heritabilitas 0,68 dan GAM 20,15. Karakter-karakter ini dapat dijadikan sebagai karakter prioritas seleksi awal untuk memperoleh kandidat genotipe sorgum unggul yang mengarah ke biomassa tanaman.



Gambar 3. Proporsi Heritabilitas dan GAM karakter pengamatan

Seleksi galur sorgum yang diiradiasi

Seleksi adalah tahapan penting dalam pemuliaan tanaman karena bertujuan untuk memilih genotipe yang superior berdasarkan target seleksi. Seleksi berdasarkan satu sifat seringkali tidak efektif untuk dilakukan karena dapat mengabaikan sifat lain yang sama pentingnya (Anisiyah *et al.*, 2025). Dalam hal ini diperlukan pendekatan integrasi berbagai sifat secara bersamaan atau secara simultan dalam memilih genotipe (Zendrato *et al.*, 2024). Indeks seleksi dapat menjadi solusi dalam pemilihan genotipe karena menggabungkan beberapa sifat dalam satu indeks yang memiliki genotipe berdasarkan arah seleksi secara efisien (Pratama *et al.*, 2024). Karakter yang berasosiasi dengan target seleksi, memiliki heritabilitas yang tinggi dan ekonomis dapat dijadikan sebagai karakter seleksi untuk pemilihan genotipe unggul (Adedugba *et al.*, 2023).

Dalam penelitian ini, karakter diameter batang, jumlah daun, tinggi tanaman dan brix dijadikan sebagai karakter seleksi simultan karena memiliki nilai heritabilitas yang tinggi serta berasosiasi dengan biomassa sorgum. Semua karakter seleksi

diharapkan tinggi sehingga arah seleksi positif dengan masing-masing karakter diberi pembobotan yang sama untuk memberikan perlakuan yang sama terhadap seleksi yang dilakukan. Hasil perhitungan standarisasi nilai setiap karakter dan nilai indeks seleksi genotipe ditampilkan pada Tabel 4.

Berdasarkan kriteria seleksi dipilih galur sorgum terbaik yang dapat digunakan untuk program pemuliaan sorgum kedepan, yaitu galur: S1R2, S1R1, S7R2, S6R0, S6R4, S6R5, S6R2, S2R0, S4R3, dan S1R0. WH Rara Tadda (S1) dan WH Manipa Tadda (S6) mendominasi pemilihan genotipe berdasarkan karakter biomassa, diikuti oleh WH Kiku Mbimbi (S7) dan WH Miting Wala (S2). Sementara itu, dosis sinar gamma yang terpilih bervariasi namun didominasi oleh dosis 200 dan 100 Gy. Genotipe-genotipe terpilih ini memiliki penampilan malai dan biji yang baik, selain performa agronomi dan biomassa, sehingga dapat dilanjutkan ke generasi selanjutnya. Pengembangan sorgum kedepan dari genotipe ini dapat diarahkan ke arah bioenergi dan pangan nasional di Indonesia.

Tabel 4. Galur sorgum hasil radiasi berdasarkan seleksi indeks.

Geno	Rata-rata					Standarisasi					Indeks seleksi
	DB	JD	TT	Brix	Biomassa	DB	JD	TT	Brix	Biomassa	
S1R2	41,0	14,3	285,0	8,7	864,6	0,7	2,0	1,6	0,3	1,3	5,8
S1R1	38,0	11,7	314,3	9,0	877,1	0,3	0,7	2,2	0,4	1,4	5,1
S7R2	43,0	9,0	267,3	11,3	855,4	1,0	-0,5	1,2	1,8	1,2	4,7
S6R0	46,7	14,0	230,0	8,8	792,7	1,4	1,8	0,4	0,3	0,6	4,6
S6R4	42,0	13,0	244,0	8,9	852,9	0,8	1,4	0,7	0,4	1,2	4,5
S6R5	39,3	13,3	237,7	9,3	849,5	0,5	1,5	0,6	0,7	1,1	4,4
S6R2	42,0	12,7	260,0	7,9	855,0	0,8	1,2	1,1	-0,2	1,2	4,1
S2R0	38,0	10,3	252,9	10,7	845,9	0,3	0,1	0,9	1,5	1,1	3,9
S4R3	39,0	14,0	235,7	8,2	844,2	0,5	1,8	0,5	-0,1	1,1	3,8
S1R0	38,0	11,3	280,7	8,3	841,9	0,3	0,6	1,5	0,0	1,1	3,5
S1R5	31,7	10,7	250,0	10,9	837,4	-0,5	0,3	0,8	1,6	1,0	3,3
S7R1	36,0	10,0	214,0	12,3	752,9	0,1	0,0	0,1	2,5	0,2	2,8
S7R4	34,7	9,0	223,2	11,6	765,2	-0,1	-0,5	0,3	2,0	0,3	2,0
S1R4	30,0	10,3	269,3	8,7	833,4	-0,7	0,1	1,3	0,3	1,0	2,0
S6R3	43,3	13,0	217,3	6,6	755,8	1,0	1,4	0,1	-1,0	0,3	1,8
S4R0	44,0	12,7	208,2	7,7	713,1	1,1	1,2	-0,1	-0,4	-0,1	1,7
S7R3	42,0	10,0	189,8	10,9	688,7	0,8	0,0	-0,5	1,6	-0,4	1,6
S2R1	38,0	10,3	222,0	7,8	800,3	0,3	0,1	0,2	-0,3	0,7	1,1
S7R0	35,0	9,7	204,8	11,3	693,4	-0,1	-0,2	-0,1	1,8	-0,3	1,1
S3R2	46,7	11,3	163,7	8,6	719,0	1,4	0,6	-1,0	0,2	-0,1	1,1
S3R0	46,7	10,0	184,9	8,4	691,2	1,4	0,0	-0,6	0,1	-0,4	0,6
S6R1	26,3	9,7	293,7	6,7	825,8	-1,2	-0,2	1,8	-0,9	0,9	0,4
S1R3	29,0	10,0	261,3	6,6	840,1	-0,8	0,0	1,1	-1,0	1,1	0,3
S2R2	29,0	9,3	234,5	7,7	805,9	-0,8	-0,3	0,5	-0,3	0,7	-0,2
S3R3	42,7	11,0	181,6	7,2	671,8	0,9	0,4	-0,6	-0,7	-0,5	-0,5
S4R1	43,3	11,0	173,0	7,2	646,7	1,0	0,4	-0,8	-0,7	-0,8	-0,8
S2R3	28,3	9,0	218,4	8,8	739,0	-0,9	-0,5	0,2	0,3	0,1	-0,8
S4R2	42,3	10,7	166,3	7,9	628,8	0,9	0,3	-1,0	-0,2	-0,9	-0,9
S7R5	34,7	9,3	170,0	8,9	638,2	-0,1	-0,3	-0,9	0,4	-0,9	-1,8
S2R4	30,0	8,3	214,9	7,7	710,1	-0,7	-0,8	0,1	-0,3	-0,2	-1,9
S2R5	31,7	7,7	205,7	7,8	724,9	-0,5	-1,1	-0,1	-0,3	0,0	-2,0
S3R1	42,7	8,7	180,2	6,4	666,9	0,9	-0,7	-0,7	-1,1	-0,6	-2,1
S3R4	36,3	8,3	178,7	6,2	661,9	0,1	-0,8	-0,7	-1,2	-0,6	-3,3
S4R4	32,3	10,0	161,0	7,2	599,5	-0,4	0,0	-1,1	-0,6	-1,2	-3,3
S5R0	20,0	8,7	192,0	8,3	686,8	-2,0	-0,7	-0,4	0,1	-0,4	-3,4
S3R5	38,0	9,0	160,0	6,6	570,1	0,3	-0,5	-1,1	-1,0	-1,5	-3,7
S4R5	34,7	10,0	147,5	7,4	532,8	-0,1	0,0	-1,4	-0,5	-1,9	-3,9
S5R3	28,0	6,3	193,7	7,4	681,4	-1,0	-1,7	-0,4	-0,5	-0,4	-4,0
S5R4	25,7	6,7	174,8	6,1	665,4	-1,2	-1,6	-0,8	-1,3	-0,6	-5,5

S5R2	20,0	6,0	151,7	6,1	532,5	-2,0	-1,9	-1,3	-1,3	-1,9	-8,3
S5R1	14,3	7,0	137,3	6,1	530,4	-2,7	-1,4	-1,6	-1,3	-1,9	-8,9
S5R5	24,0	5,7	101,1	6,3	520,8	-1,5	-2,0	-2,3	-1,2	-2,0	-9,0

SIMPULAN

1. Penelitian ini menunjukkan keragaman genetik pada varietas lokal sorgum yang dilihat dari interaksi varietas dan dosis berpengaruh signifikan terhadap karakter pengamatan, seperti tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun dan anakan, waktu pembungaan, sudut daun, klorofil (SPAD) dan brix (%), hingga karakter biomassa
2. Karakter biomassa berkolerasi positif signifikan terhadap tinggi tanaman ($r=0,92$) dan karakter lain seperti panjang daun, diameter batang, jumlah daun dan buku, dan brix.
3. Keragaman genetik tinggi pada karakter-karakter pengamatan. Tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang dan brix memiliki nilai heritabilitas $>0,87$ dan GAM yang tinggi ($>27,83$) sehingga dapat dijadikan karakter seleksi.
4. Diperoleh 10 genotipe sorgum terbaik berdasarkan karakter biomassa, yaitu S1R2, S1R1, S7R2, S6R0, S6R4, S6R5, S6R2, S2R0, S4R3, dan S1R0. Genotipe-genotipe ini dapat dilakukan untuk pengembangan produksi bioenergi ke depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada teknisi dan mahasiswa yang membantu penelitian ini. Publikasi ini didukung oleh Universitas Kristen Satya Wacana melalui kegiatan *Writers Camp* 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Adedugba, A. A., Adeyemo, O. A., Adetumbi, A. J., Amusa, O. D., & Ogunkanmi, L. A. (2023). Evaluation of genetic variability for major agro-morphological and stalk sugar traits in African sorghum genotypes. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14622>
- Anggraini, M., Astuti, D., (2023). Kisaran Dosis Optimal Iradiasi Sinar Gamma untuk Menginduksi Keragaman Genetik Sorgum Varietas Numbu Gamma Irradiation Optimum Dose Range to Induce Genetic Diversity of Sorghum Numbu Variety. 2(2).
- Anisiyah, Indriatama, W. M., Sihono, Bachtar, T., Nurcholis, M., Herlambang, S., & Human, S. (2025). Agronomic performance, genetic variability estimation and mutant selection in M3 generation of sorghum under optimum condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1446(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1446/1/012023>
- Arif Rahman, Dwi Ratna Anugrahwati, & Akhmad Zubaidi. (2022). Uji Daya Hasil Beberapa Genotip Tanaman Sorgum (*Sorghum bicolor*. L Moench) Di Lahan Kering Lombok Utara. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomples*, 1(2), 164–171. <https://doi.org/10.29303/jima.v1i2.1448>

- Carbajal-Friedrich, A. A. J., & Burgess, A. J. (2024). The role of the ideotype in future agricultural production. *Frontiers in Plant Physiology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fphgy.2024.1341617>
- Dare, D., Trikoesoemaningtyas, Wirnas, D., & Soepandi, D. (2024). Genetic variability and multi-trait selection of biomass and stalk juice for bioenergy in sorghum segregating populations. *Biodiversitas*, 25(11), 4425–4437. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d251142>
- Hong, M. J., Kim, D. Y., Jo, Y. D., Choi, H. Il, Ahn, J. W., Kwon, S. J., Kim, S. H., Seo, Y. W., & Kim, J. B. (2022). Biological Effect of Gamma Rays According to Exposure Time on Germination and Plant Growth in Wheat. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/app12063208>
- Kiani, D., Borzouei, A., Ramezanpour, S., Soltanloo, H., & Saadati, S. (2022). Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14949-6>
- Kumari, V. V., Deo, A., Bora, K., Rama Rao, C. A., Raju, B. M. K., Chandran, M. A. S., Sriram, K., Singh, V. K., & Aggarwal, P. K. (2025). Adapting sorghum and other millets to climate challenges: An integrated bibliometric and meta-analysis of global literature. In *Journal of Agriculture and Food Research* (Vol. 21). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101987>
- Maftuchah, Febriana, L., Sulistyawati, Reswari, H. A., & Septia, E. D. (2021). Morphological diversity and heritability of nine local sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes in east java, indonesia. *Biodiversitas*, 22(3), 1310–1316. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220330>
- Mantilla-Perez, M. B., & Salas Fernandez, M. G. (2017). Differential manipulation of leaf angle throughout the canopy: Current status and prospects. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 68, Issues 21–22, pp. 5699–5717). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx378>
- Muazam, A., Kristamtini, Widyayanti, S., & Daryono, B. S. (2024). Morphological diversity of local sorghum cultivars (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) from Gunungkidul, Yogyakarta, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1377(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1377/1/012091>
- Munthe, R., Ardian, A., Setiawan, K., & Sa'diyah, N. (2024). KERAGAMAN GENETIK DAN HERITABILITAS KARAKTER TINGGI TANAMAN DAN JUMLAH DAUN BEBERAPA GENOTIPE SORGUM (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Jurnal Agrotek Tropika*, 9(1), 90. <https://doi.org/10.23960/jat.v12i1.8550>
- Murthy, H., Suroso, B., Hendriyanto, A., & Arum, L. S. (2023). Keragaan Tanaman Sorgum Lokal Mutan 1 Hasil Iradiasi Sinar Gamma. In *Jurnal Penelitian Ipteks* (Vol. 8, Issue 2).

- Mustikawati, D. R., Barus, J., Arief, R. W., Girsang, E. S., & Ratmini, N. P. S. (2024). Sorghum and Eco-Friendly Agriculture In Indonesia. *Journal of Law and Sustainable Development*, 12(7), e3807. <https://doi.org/10.55908/sdgs.v12i7.3807>
- Nazli, R. I., Aslankaciran, C., Yang, D., Liaqat, W., Polat, M., Cavdar, A. S., Tansi, V., & Baloch, F. S. (2024). Assessment of Sweet Sorghum Genotypes for Bioethanol Production Potential and Bagasse Combustion Characteristics in a Semi-Arid Mediterranean Climate. *Agronomy*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy14112626>
- Ngidi, A., Shimelis, H., Abady, S., Chaplot, V., & Figlan, S. (2024). Genetic variation and association of yield, yield components, and carbon storage in sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) genotypes. *BMC Genomic Data*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12863-024-01256-4>
- Pratama, M. A. J., Trikoesoemaningtyas, T., & Wirnas, D. (2024). Pendugaan parameter genetik karakter biomassa dan hasil pada galur-galur F7 sorgum numbu X samurai 2. *Jurnal AGRO*, 11(1), 187–201. <https://doi.org/10.15575/35978>
- Qosim, W. A., Anas, A., Amien, S., Rachmadi, M., Ramdani, S., & Islami, R. Z. (2024). The effect of various doses of gamma ray irradiation on growth and chlorophyll changes of three adlay genotypes. *Kultivasi*, 23(2). <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v23i2.55619>
- Sharif, Y. O. N. A., Madab, D. S., & Hindi, H. A. (2024). Estimation of Path Analysis and Genetic Parameters for Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Varieties in Different Environments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1371(5). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1371/5/052035>
- Shukla, S., Felderhoff, T. J., Saballos, A., & Vermerris, W. (2017). The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research*, 203, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.004>
- Sihono, S., Indriatama, W. M., Human, S., Puspitasari, W., Iqbal, M., & Fitrianto, N. (2023). Penampilan Sifat Agronomi 9 Galur Mutan Harapan Sorgum Manis di 2 Lokasi Pengujian. *Zuriat*, 34(1), 52. <https://doi.org/10.24198/zuriat.v34i1.46674>
- Singh, S., Habib, M., Mondal, D., Kumar, Y., Jan, S., Bashir, K., Rao, E. S., & Jan, K. (2024). Gamma Irradiation–Induced Structural Modification of Sorghum Flour and Its Impact on the Physicofunctional, Rheological, and Thermal Properties of Extracted Starch. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/2228239>
- Sulistiyowati, Y., Nurhasanah, A. N., Rachmat, A., Astuti, D., Widyajayantie, D., Pantouw, C. F., Windiastri, V. E., Idayat, M. T. H., Rahmawati, S., & Nugroho, S. (2022). Seleksi dan Evaluasi Sorgum Mutan

- Generasi M2 Hasil Radiasi Sinar Gamma untuk Peningkatan Karakter Biomassa. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 22(2), 138–145. <https://doi.org/10.25181/jppt.v22i2.2302>
- Takanashi, H. (2023). Genetic control of morphological traits useful for improving sorghum. In *Breeding Science* (Vol. 73, Issue 1, pp. 57–69). Japanese Society of Breeding. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.22069>
- Wardhani, A. P. K., & Wirnas, D. (2024). Keragaman Genetik Karakter Agronomi dan Amilosa Populasi Sorgum F3 Hasil Persilangan Pulut 3 x Soraya 3. *Buletin Agrohorti*, 12(1), 52–59. <https://doi.org/10.29244/agrob.v12i1.53055>
- Wirawan, S. S., Solikhah, M. D., Widiyanti, P. T., Nitamiwati, N. P. D., Romelan, R., Heryana, Y., Nurhasanah, A., & Sugiyono, A. (2024). Unlocking Indonesia's sweet sorghum potential: A techno-economic analysis of small-scale integrated sorghum-based fuel grade bioethanol industry. *Bioresource Technology Reports*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101706>
- Wirnas, D., Oktanti, N., Rahmi, H. N., Andriani, D., Faturrahman, Rini, E. P., Marwiyah, S., Trikoesoemaningtyas, & Sopandie, D. (2021). Genetic analysis for designing an ideotype of high-yielding sorghum based on existing lines performance. *Biodiversitas*, 22(12), 5286–5292. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d221208>
- Xin, Z., Wang, M., Cuevas, H. E., Chen, J., Harrison, M., Pugh, N. A., & Morris, G. (2021). Sorghum genetic, genomic, and breeding resources. In *Planta* (Vol. 254, Issue 6). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03742-w>
- Zendrato, Y. M., Suwarno, W. B., & Marwiyah, S. (2024). Multi-Trait Selection Of Tropical Maize Genotypes Under Optimum And Acidic Soil Conditions. *Sabao Journal of Breeding and Genetics*, 56(1), 142–155. <https://doi.org/10.54910/sabao2024.56.1.13>