



Respon perkecambahan dan estimasi nilai LD₅₀ mutagen sodium azide pada benih kedelai galur M.1.1.3

Germination response and LD₅₀ estimation of sodium azide mutagen in M.1.1.3 soybean line

Istover Suyansyah¹ | Nilahayati Nilahayati^{1,*} | Hafifah Hafifah¹ | Rd. Selvy Handayani¹ | Laila Nazirah¹

¹ Program Studi Magister Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Malikussaleh, Aceh Utara, Aceh 243355, Indonesia

Article citation:

Suyansyah, I., Nilahayati, N., Hafifah, H., Handayani R. S., & Nazirah, L. (2025). Respon perkecambahan dan estimasi nilai LD₅₀ mutagen sodium azide pada benih kedelai galur M.1.1.3. *Jurnal Agrium*, 22(4), 455–464. <https://doi.org/10.29103/agrium.v22i4.25770>.

Article history:

Received: October 8, 2025
Revised: December 22, 2025
Accepted: December 24, 2025
Published: December 29, 2025

*Corresponding author:

Nilahayati Nilahayati
Email: nilahayati@unimal.ac.id

Copyright:

©2025 Author(s). This article is published as open access under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that appropriate credit is given to the original Author(s) and the source.

Abstrak

Kedelai (*Glycine max* L. Merrill) merupakan salah satu komoditas pangan penting di Indonesia dengan kebutuhan rata-rata 2,2 juta ton per tahun, namun 67,99% di antaranya masih dipenuhi melalui impor. Upaya peningkatan produksi kedelai dapat dilakukan dengan perbaikan varietas melalui pemuliaan mutasi. Penentuan *lethal dose* 50 (LD₅₀) merupakan tahap penting dalam induksi mutasi untuk memperoleh konsentrasi mutagen yang efektif. Penelitian ini bertujuan menentukan nilai LD₅₀ mutagen sodium azide (SA) pada benih kedelai galur M.1.1.3. Penelitian dilakukan di Laboratorium Fakultas Pertanian Universitas Malikussaleh pada Juni–September 2023. Benih kedelai galur M.1.1.3 direndam dalam larutan SA dengan enam konsentrasi (0, 2, 4, 6, 8, dan 10 ppm) selama 4 jam, kemudian disemai pada media tanah : pasir : pupuk kandang (1:1:1). Peubah yang diamati meliputi persentase perkecambahan dan tinggi bibit pada umur 7 dan 14 HST. Data dianalisis menggunakan perangkat lunak *Curve Expert 1.4* untuk menentukan nilai LD₅₀ sodium azide pada benih kedelai galur M.1.1.3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase perkecambahan tertinggi terdapat pada kontrol (0 ppm) sebesar 93,33%, sedangkan pada konsentrasi 10 ppm hanya 6,66%. Perlakuan mutagen SA 10 ppm mengakibatkan kematian semua kecambah kedelai galur M.1.1.3 pada umur 14 HST. Analisis kurva regresi menghasilkan nilai LD₅₀ pada konsentrasi SA sebesar 5,56 ppm. Nilai ini menunjukkan bahwa konsentrasi efektif sodium azide yang berpotensi menghasilkan mutasi terletak sedikit di bawah 5,56 ppm. Temuan ini dapat dijadikan dasar dalam menentukan konsentrasi mutagen yang tepat pada program pemuliaan kedelai melalui induksi mutasi dengan sodium azide.

Kata kunci: LD₅₀, mutagen, kedelai, sodium azide



Abstract

Soybean (*Glycine max* L. Merrill) is a strategic food commodity in Indonesia with an annual demand of approximately 2.2 million tons, of which 67.99% is still fulfilled through imports. Increasing soybean production can be achieved through varietal improvement, one of which is mutation induction. Determining the lethal dose 50 (LD₅₀) is an essential step to obtain the most effective mutagenic concentration. This study aimed to determine the LD₅₀ value of soybean line M.1.1.3 using sodium azide (SA) as a mutagen. The experiment was conducted at the Laboratory of the Faculty of Agriculture, Malikussaleh University, from June to September 2023, using six concentrations of SA (0, 2, 4, 6, 8, and 10 ppm). Seeds were soaked in the mutagen solution for 4 hours and then sown in a soil : sand : manure medium (1:1:1). Observed variables included germination percentage and seedling height at 7 and 14 days after sowing (DAS). The results showed the highest germination percentage in the control (93.33%) and the lowest at 10 ppm (6.66%). Regression curve analysis using Curve Expert 1.4 shows an LD₅₀ value of 5.56 ppm. This result indicates that the effective concentration of sodium azide with potential mutagenic effects lies slightly below 5.56 ppm for soybean line M.1.1.3. The results provide a useful reference for selecting the effective sodium azide concentration in mutation-based soybean improvement programs.

Keywords: LD₅₀, mutagen, soybeans, sodium azide

Pendahuluan

Kedelai (*Glycine max* L. Merrill) merupakan salah satu komoditas pangan utama di Indonesia selain padi dan jagung. Tanaman ini berperan penting sebagai sumber protein nabati, lemak, vitamin, serta senyawa bioaktif seperti isoflavon yang bermanfaat bagi kesehatan manusia. Menurut Krisnawati (2017), permintaan kedelai di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, dengan kebutuhan rata-rata mencapai 2,2 juta ton per tahun. Namun, sekitar 67,99% kebutuhan tersebut masih dipenuhi melalui impor. Sibuea et al. (2024) menyatakan bahwa Amerika Serikat menempati peringkat pertama sebagai negara pengekspor kedelai terbesar ke Indonesia. Pangsa ekspor kedelai dari Amerika Serikat sangat besar, yaitu mencapai sekitar 72% dari total impor kedelai Indonesia.

Penurunan produksi dan tingginya ketergantungan pada impor menunjukkan perlunya strategi pemuliaan tanaman kedelai yang dapat menghasilkan varietas unggul baru dengan produktivitas tinggi dan adaptif terhadap lingkungan. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah melalui induksi mutasi. Mutasi alami pada tanaman umumnya sangat jarang terjadi, sehingga induksi mutasi buatan dengan mutagen menjadi pendekatan yang lebih efisien untuk memperoleh variasi genetik yang dibutuhkan (Van Harten, 1998).

Induksi mutasi dapat dilakukan dengan mutagen fisik maupun kimia. Mutagen fisik yang banyak digunakan adalah iradiasi sinar gamma seperti pada kedelai (Nilahayati et al., 2022), sementara mutagen kimia yang umum digunakan meliputi ethyl methane sulfonate (EMS) (Nilahayati et al., 2024a), diethyl sulfate (DES), methyl methane sulfonate (MMS), hydroxylamine, dan sodium azide (SA). Mutagen kimia bekerja terutama pada tingkat gen dengan menyebabkan mutasi titik (*point mutation*), sehingga dapat menghasilkan variasi genetik yang lebih halus tanpa perubahan kromosom yang besar.



Sodium azide (SA) merupakan salah satu mutagen kimia yang telah banyak digunakan karena efektif dalam menginduksi mutasi pada tingkat genetik (Khan et al., 2009). Sodium azide relatif aman digunakan, murah, tidak bersifat karsinogenik, dan sangat efisien sehingga banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan sifat agronomis berbagai tanaman budidaya, termasuk padi, jagung, gandum, barley, kacang polong, oat, tebu, selada, bunga matahari, rapeseed, tomat, kedelai, kacang tanah, dan cabai (Mir & Jan, 2023).

Konsentrasi mutagen adalah faktor kunci dalam penggunaannya, di mana hasil pengujian mutagenesis sangat bergantung pada penggunaan konsentrasi mutagen yang tepat. Penentuan *lethal dose 50* merupakan tahap awal yang sangat penting dalam penelitian induksi mutasi. LD₅₀ didefinisikan sebagai konsentrasi mutagen yang menyebabkan penurunan viabilitas benih hingga 50% setelah perlakuan. Nilai LD₅₀ digunakan sebagai acuan untuk menentukan konsentrasi mutagen optimal yang mampu menghasilkan mutasi dengan tetap mempertahankan viabilitas benih dalam jumlah yang memadai (Mba et al., 2010).

Setiap genotipe tanaman memiliki nilai LD₅₀ yang spesifik, tergantung pada mutagen yang digunakan serta kondisi fisiologis benih. Penelitian yang dilakukan oleh Chaudary et al. (2021) menunjukkan bahwa nilai LD₅₀ sodium azide untuk tanaman *Cajanus cajan* adalah 1,60 mM sampai 2,69 mM. Raina et al. (2018) mendapatkan nilai LD₅₀ sodium azide sebesar 0.04% pada tanaman *cowpea* varietas Gomati VU-89 dan Pusa 578.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menentukan nilai LD₅₀ kedelai galur M.1.1.3 menggunakan sodium azide sebagai dasar bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan varietas kedelai melalui teknik mutasi.

Metode penelitian

Waktu dan tempat penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni hingga September 2023 di Laboratorium Fakultas Pertanian Universitas Malikussaleh, Aceh Utara. Kegiatan penelitian meliputi persiapan bahan, perlakuan benih dengan mutagen sodium azide (SA), penyemaian, pemeliharaan kecambah, serta pengamatan dan analisis data.

Bahan dan alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah benih kedelai galur M.1.1.3. Bahan pendukung lainnya meliputi tanah, pasir, pupuk kandang sebagai media tanam, buffer larutan dengan pH 4, sodium azide (SA) sebagai mutagen, dan akuades steril untuk membilas benih setelah perendaman. Alat-alat yang digunakan meliputi gelas ukur untuk pengukuran volume larutan, pipet tetes, mikropipet, botol kultur sebagai wadah perendaman, spatula, pinset untuk memindahkan benih, bola hisap, timbangan analitik untuk penimbangan sodium azide, kertas label, tray semai untuk media perkecambahan, serta peralatan tambahan kamera atau alat dokumentasi untuk pencatatan hasil pengamatan.

Pembuatan larutan mutagen SA

Larutan stok sodium azide dibuat dengan cara melarutkan 1 g sodium azide ke dalam 100 ml buffer pH 4 sehingga diperoleh larutan induk dengan konsentrasi 1%. Larutan stok ini kemudian diencerkan sesuai dengan konsentrasi yang digunakan dalam



penelitian, yaitu 0 ppm (kontrol), 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, dan 10 ppm.

Perlakuan benih

Benih kedelai galur M.1.1.3 terlebih dahulu dipilih dengan memastikan tidak ada kerusakan fisik seperti retak, cacat, atau serangan hama. Benih kemudian direndam dalam masing-masing larutan sodium azide sesuai dengan konsentrasi perlakuan selama 4 jam. Selama proses perendaman, larutan dikocok ringan secara berkala agar seluruh permukaan benih terendam merata.

Setelah perendaman selesai, benih dibilas menggunakan akuades steril sebanyak tiga kali untuk menghilangkan sisa-sisa mutagen yang menempel pada permukaan benih. Tahap pembilasan dilakukan dengan hati-hati agar tidak merusak embrio benih. Selanjutnya benih dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum disemai pada media semai.

Penyemaian dan pemeliharaan

Media tanam dibuat dari campuran tanah, pasir, dan pupuk kandang dengan perbandingan 1:1:1. Campuran media tersebut dimasukkan ke dalam tray semai hingga seluruh lubang terisi merata. Sebelum benih ditanam, media terlebih dahulu disiram dengan air hingga lembab.

Benih dari setiap perlakuan disemai sebanyak 30 biji per tray. Setiap konsentrasi perlakuan dilakukan dengan pengulangan sesuai kebutuhan percobaan. Benih ditanam dengan kedalaman ± 2 cm dan jarak antar lubang semai diatur agar pertumbuhan kecambah tidak saling bersinggungan.

Pemeliharaan dilakukan dengan menjaga kelembaban media melalui penyiraman air menggunakan sprayer sebanyak dua kali sehari (pagi dan sore). Media semai dijaga agar tidak terlalu kering maupun terlalu basah. Selain itu, tray semai diletakkan pada kondisi dengan intensitas cahaya alami agar kecambah dapat tumbuh optimal.

Peubah yang diamati yang diamati adalah :

1. Persentase daya tumbuh (%): Daya tumbuh benih dihitung pada umur 1 dan 2 minggu setelah tanam (MST). Perhitungannya dilakukan dengan membagi jumlah seluruh benih yang tumbuh setelah diberi mutagen SA dengan seluruh benih yang diberikan mutagen EMS kemudian dikalikan dengan 100%.
2. Tinggi kecambah (cm): Tinggi kecambah diukur dengan menggunakan penggaris, dihitung dari pangkal batang sampai ujung bibit pada umur 7 dan 14 HST.

Analisis data

Data persentase perkecambahan pada masing-masing perlakuan digunakan untuk menentukan nilai *Lethal Dose 50* (LD_{50}), yaitu konsentrasi sodium azide yang mampu menurunkan daya kecambah sebesar 50% dibandingkan kontrol. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Curve Expert 1.4. Aplikasi ini digunakan untuk menentukan model persamaan regresi terbaik yang menggambarkan hubungan antara konsentrasi sodium azide dan persentase perkecambahan.

Hasil dan pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase perkecambahan kedelai galur M.1.1.3 menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi sodium azide. Pada perlakuan kontrol (0 ppm), daya kecambah mencapai 93,33% pada 7 HST dan 90,00% pada 14

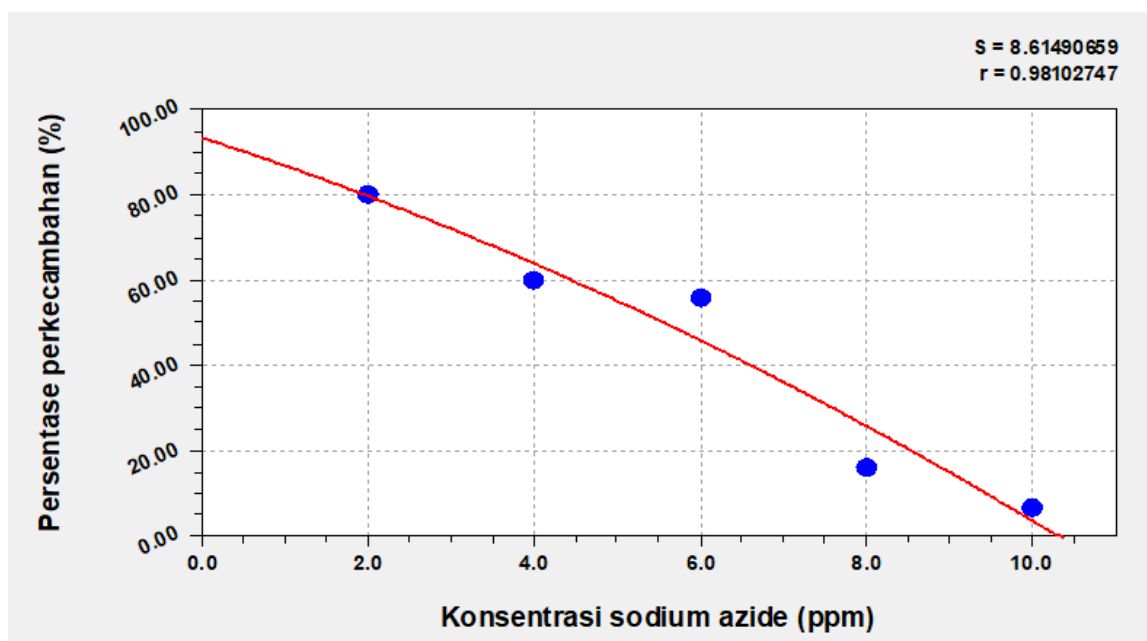
Tabel 1

Persentase perkecambahan benih kedelai galur M.1.1.3 akibat perlakuan beberapa konsentrasi mutagen sodium azida (SA).

Konsentrasi SA (ppm)	Persentase perkecambahan (%)	
	(7 HST)	(14 HST)
0	93,33	90
2	80	73
4	60	53
6	56	50
8	16	0
10	6,66	0

HST. Sementara itu, pada konsentrasi tertinggi (10 ppm) hanya 6,66% pada 7 HST dan tidak ada benih yang bertahan hidup hingga 14 HST (Tabel 1).

Semakin tinggi konsentrasi mutagen sodium azide maka persentase perkecambahan akan semakin rendah. Menurut Mir dan Jan (2023), senyawa sodium azide setelah dimetabolisme oleh tanaman dapat mengganggu aktivitas normal sel dengan memengaruhi kadar kalsium intraseluler sehingga menurunkan kadar kalmodulin dan produksi ATP. Rendahnya kadar ATP mengganggu organisasi benang spindel dan pergerakan kromosom selama mitosis. Selain itu, sodium azide juga mengganggu proses respirasi dalam sel dengan menghambat berbagai aktivitas enzimatik, termasuk peroksidase, katalase, sitokrom oksidase, serta pompa proton yang berujung pada penghambatan siklus sel.



Gambar 1

Kurva hubungan konsentrasi sodium azide dengan persentase perkecambahan kedelai galur M.1.1.3 serta nilai LD₅₀.



Potdukhe (2004) menyatakan bahwa penghambatan pertumbuhan perkecambahan benih tergantung pada dosis mutagen. Semakin tinggi dosis yang digunakan, maka persentase daya berkecambah tanaman semakin rendah. Hal ini diperkuat dengan pendapat Sari et al. (2012) yang menyatakan bahwa semakin tinggi konsentrasi mutagen, maka pertumbuhan tanaman akan semakin terganggu dikarenakan gangguan fisiologis yang semakin meningkat seiring bertambahnya dosis mutagen.

Hasil penelitian ini konsisten dengan berbagai laporan sebelumnya yang menunjukkan bahwa perlakuan mutagen, baik fisik maupun kimia, umumnya menyebabkan penurunan daya kecambah benih kedelai. Nilahayati et al. (2021) melaporkan bahwa perlakuan iradiasi sinar gamma pada kedelai varietas Kipas Putih dengan dosis 200–1000 Gray menurunkan persentase perkecambahan secara signifikan dibandingkan control. Penurunan ini juga diikuti dengan berkurangnya tinggi kecambah dan kelangsungan hidup tanaman seiring meningkatnya dosis iradiasi. Hasil serupa dilaporkan oleh Nilahayati et al. (2024b) pada kedelai varietas Gepak Kuning yang diberi perlakuan mutagen kimia EMS, di mana peningkatan konsentrasi EMS dari 0,25% hingga 1% menyebabkan penurunan tajam pada persentase perkecambahan dan tinggi kecambah.

Hasil analisis dengan *Curve Expert 1.4* menunjukkan bahwa nilai *lethal dose 50* (LD_{50}) kedelai galur M.1.1.3 tercapai pada konsentrasi 5,56 ppm (Gambar 1).

Tabel 2 lebih lanjut menampilkan model regresi terbaik yang menggambarkan hubungan konsentrasi sodium azide dengan persentase perkecambahan adalah model *Rational function* dengan nilai koefisien korelasi (R) sebesar 0,981. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel sangat erat dan model persamaan yang diperoleh dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi LD_{50} secara akurat.

Nilai LD_{50} diperoleh berdasarkan respon kematian kecambah terhadap dosis mutagen sodium azida. Pada benih kedelai galur M.1.1.3 diperoleh pada konsentrasi SA 5,56 ppm.

Ali et al. (2024) mendapatkan nilai LD_{50} yang sama pada kedua genotipe kacang hijau *Pusa 1031* dan *Pusa 1431*, yaitu 0,047 mM. Tarhan et al. (2025) memperoleh nilai LD_{50} sebesar 5,8% SA pada kacang arab varietas Arda. Perlakuan SA berpengaruh terhadap pertumbuhan bibit dan akar. Peningkatan dosis SA menyebabkan keterlambatan perkecambahan serta penurunan vigor bibit dan perkembangan akar. Fajriah et al. (2019) menambahkan bahwa dosis letal median (LD_{50}) SA pada kedelai varietas Dering diperoleh pada konsentrasi 0,663 mM. Perlakuan dengan mutagen SA menginduksi keragaman tinggi tanaman dan jumlah daun pada kondisi tanah salin maupun non-salin.

Tabel 2

Persamaan regresi dari persentase hidup dan konsentrasi mutagen SA.

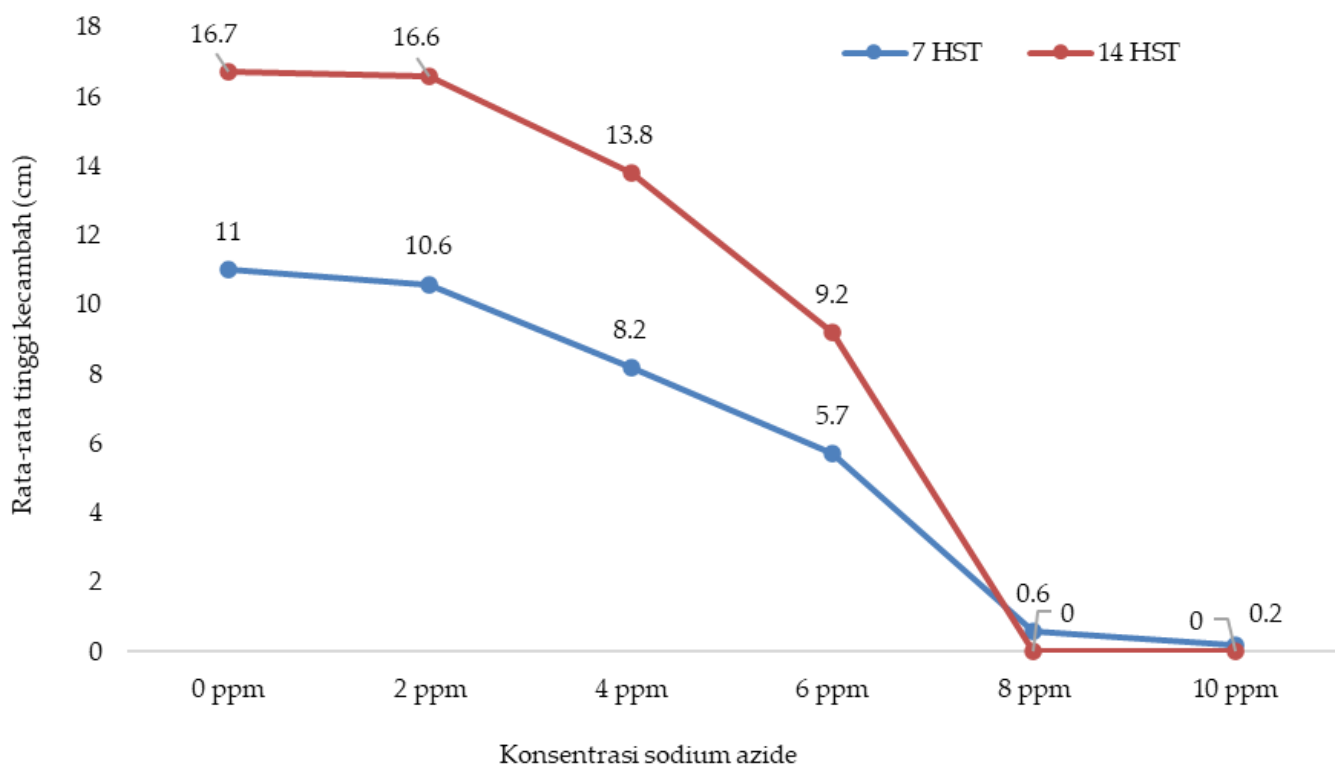
Model fungsi	Persamaan	Persamaan parameter	R	LD_{50}
<i>Rational function</i>	$y=a+bx+cx^2$	$a = 9,337$	0,9810275	5,56 ppm
		$b = 6,309$		
		$c = 2,680$		

Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakter pertumbuhan bibit mengalami penurunan linear seiring peningkatan konsentrasi mutagen, dengan perbedaan antar spesies atau genotipe tanaman dalam hal vigor dan performa bibit. Hasil ini menunjukkan bahwa respon fisiologis masing-masing genotipe tetap bervariasi, sehingga evaluasi karakter pertumbuhan diperlukan untuk melengkapi penentuan dosis mutagen yang efektif.

Penentuan LD₅₀ merupakan tahapan penting dalam pemuliaan mutasi, karena setiap genotipe memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap mutagen (Mba et al., 2010). Nilai LD₅₀ yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk perlakuan mutasi pada generasi pertama sehingga diharapkan muncul keragaman genetik yang berguna untuk seleksi sifat unggul kedelai.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi mutagen SA 0 ppm (kontrol) memiliki pertumbuhan yang paling tinggi dan konsentrasi 10 ppm memiliki pertumbuhan yang paling rendah pada umur 7 dan 14 HST (Gambar 2).

Perlakuan mutagen sodium azide pada benih kedelai galur M.1.1.3 memengaruhi pertumbuhan awal bibit. Pada perlakuan kontrol, bibit tumbuh lebih tinggi dan sehat dibandingkan dengan perlakuan sodium azide. Pada konsentrasi 10 ppm, bibit yang muncul berukuran kerdil, abnormal dan umur 14 HST mengalami kematian. Hal ini menunjukkan adanya efek toksik sodium azide pada fase pertumbuhan awal tanaman,



Gambar 2

Grafik tinggi kecambah kedelai galur M.1.1.3 akibat perlakuan berbagai konsentrasi sodium azide.



sejalan dengan hasil penelitian Adamu dan Aliyu (2007) pada tomat dan Ahadiyat et al. (2021) pada padi.

Aplikasi SA pada konsentrasi yang tinggi memberikan efek negatif terhadap karakter bibit dan akar melalui hambatan pada proses fisiologis serta aktivitas enzimatik. Gangguan tersebut terutama terkait dengan penekanan respirasi seluler, penghambatan sintesis protein, dan perubahan aktivitas enzim oksidatif yang berperan dalam metabolisme awal perkecambahan. Hambatan ini berimplikasi pada menurunnya vigor bibit, pertumbuhan akar yang tereduksi, serta keterlambatan perkembangan hipokotil.

Hasil serupa juga dilaporkan oleh Turkoglu et al. (2023) dan Ali et al. (2024), yang menyatakan bahwa mutagen kimia dapat memicu stres oksidatif serta mengubah stabilitas membran sel, sehingga berdampak langsung pada pertumbuhan awal tanaman. Dengan demikian, walaupun konsentrasi LD₅₀ dapat memberikan gambaran umum mengenai tingkat letalitas, evaluasi parameter fisiologis dan enzimatik tetap penting untuk memahami respon genotipe terhadap mutagen secara komprehensif.

Kesimpulan

Peningkatan konsentrasi mutagen SA mengurangi persentase perkecambahan dan tinggi kecambah kedelai galur M.1.1.3. Nilai estimasi LD₅₀ kedelai galur M.1.1.3 akibat perlakuan SA yaitu pada konsentrasi 5.56 ppm.

Daftar pustaka

- Adamu, A. K., & Aliyu, H. (2007). Morphological effects of sodium azide on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Science World Journal*, 1(2), 9–12. <https://doi.org/10.4314/swj.v2i4.51755>.
- Ahadiyat, Y. R., Triani, A., & Nurchasanah, S. (2021). Respons padi Inpari terhadap mutagen sodium azide. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 21(1), 51–60. <https://doi.org/10.25181/jppt.v21i1.1996>.
- Ali, S. M. D., Konjengbam, N. S., Ahmad, F., Sanasam, S., & Kumawat, R. (2024). Ascertaining lethal dose 50 (\$LD_{50}\$) and simultaneous effect of ethyl methane sulphonate (EMS) and sodium azide (SA) on seedling characters in mungbean genotypes 'Pusa 1031' and 'Pusa 1431'. *Legume Research - An International Journal*, 47 (11), 1929–1935. <https://doi.org/10.18805/LR-5255>.
- Chaudhary, L., Sharma, R., & Kumar, M. (2021). Estimation of LD₅₀ and effect of sodium azide on germination and seedling parameters of different cultivars of *Cajanus cajan* (L.) Millspaugh. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 13(3), 279–285. <https://doi.org/10.1007/s13530-021-00105-6>.
- Fajriyah, N., Karno, K., & Kusmiyati, F. (2019). Induksi mutasi kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill) dengan sodium azida pada tanah salin. *Journal of Agro Complex*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.14710/joac.3.1.1-8>.
- Khan, S., Al-Qurainy, F., & Anwar, F. (2009). Sodium azide: A chemical mutagen for enhancement of agronomic traits of crop plants. *Environmental We International Journal of Science and Technology*, 4(1), 1–2.
- Krisnawati, A. (2017). Kedelai sebagai sumber pangan fungsional (Soybean as source of



- functional food). *Iptek Tanaman Pangan*, 12(1), 57–65. <https://doi.org/10.21082/jpntp.v1n1.2017.p65-71>.
- Mba, C., Afza, R., Bado, S., & Jain, S. M. (2010). Induced mutagenesis in plants using physical and chemical agents. In *Plant Cell Culture: Essential Methods* (pp. 111–130). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9780470686522.ch7>.
- Mir, S. H., & Jan, I. (2023). Sodium azide as a mutagen. In *Biotechnologies and Genetics in Plant Mutation Breeding* (pp. 89–121). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003305064-5>.
- Nilahayati, Hanafiah, D. S., & Rosmaina. (2021). Germination and seedling growth of Kipas Putih soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) in various dosage of gamma rays irradiation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 637(1), 012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012052>.
- Nilahayati, Rosnina, & Syahputra, J. (2022). RAPD analysis for genetic variability of soybean mutant resulting from gamma rays irradiation in M6 generation. *Agricultural Science Digest*, 42(6), 723–728. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n140104>.
- Nilahayati, Handayani, R. S., Harahap, M. S. A., Irawan, G., Anggraini, A., & Siregar, N. K. (2024a). Induction of genetic diversity in gepak kuning soybean cultivar and M. 1.1.3 line using ethyl methane sulfonate in M1 generation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1362(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1362/1/012024>.
- Nilahayati, Handayani, R. S., Harahap, M. S. A., & Irawan, G. (2024b). Determination of lethal dose 50 for induced mutagenesis in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] cv. Gepak Kuning through ethyl methane sulfonate mutagen. *Agricultural Science Digest*, 44(5), 892–897.
- Potdukhe, N. R. (2004). Effect of physical and chemical mutagens in M1 generation in red gram (*Cajanus cajan*). *National Journal of Plant Improvement*, 6(2), 108–111.
- Raina, A., Khursheed, S., & Khan, S. (2018). Optimisation of mutagen doses for gamma rays and sodium azide in cowpea genotypes. *Trends in Biosciences*, 11(13), 2386–2389.
- Sari, N. K. Y., Pharmawati, M., & Junitha, I. K. (2012). Pengaruh mutagen kimia sodium azida terhadap morfologi tanaman cabai besar (*Capsicum annum* L.). *Jurnal Metamorfosa*, 1(1), 25–28.
- Sibuea, F. A., Sibuea, M. B., & Safitri, S. A. (2024). Indonesian soybean import in international trade. *Jurnal Manajemen & Agribisnis*, 21(1), 122–132. <https://doi.org/10.17358/jma.21.1.122>.
- Tarhan, M., & Bicer, B. T. (2025). Investigation of LD₅₀, GR₅₀ and seedling development in sodium azide and ethyl methane sulfonate treatments of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Bangladesh Journal of Botany*, 54(3), 419–424. <https://doi.org/10.3329/bjb.v25i3.84331>.
- Turkoglu, A., Tosun, M., & Haliloglu, K. (2023). Effect of sodium azide treatment at different duration and concentration on germination and seedling growth characters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 16(2), 406–422. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.1058149>.



- Van Harten, A. M. (1998). *Mutation breeding: Theory and practical applications*. Cambridge University Press.
- 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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01326>.