



Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Kedelai (*Glycine max L. Merr.*) sebagai Respon Pemberian Pupuk Organik Cair dan NPK

¹Ediwirman, ²Ermawati, ³Anggi Julian Julian

Email : *corresponding author: ediwirman_tamsis@yahoo.co.id

Universitas Tamansiswa Padang.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history

Received 25-12-2025

Accepted 12-02-2026

Keywords

C. glomerata;

LOF;

NPK;

root nodule;

Kedelai merupakan komoditas strategis dalam sistem pangan nasional, namun produktivitasnya di lahan kering masih rendah akibat keterbatasan kesuburan tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh tunggal dan gabungan pupuk organik cair (POC) dan pupuk NPK terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai. Penelitian dilaksanakan di lahan kering pada April–Juli 2024 menggunakan Rancangan Acak Kelompok faktorial dengan tiga ulangan. Perlakuan terdiri atas tiga konsentrasi POC (0, 25, dan 50 mL L⁻¹) serta tiga dosis NPK (0, 150, dan 300 kg ha⁻¹). Variabel yang diamati meliputi karakter pertumbuhan vegetatif, jumlah bintil akar efektif, serta komponen hasil berupa karakteristik polong dan biomassa biji. Data dianalisis menggunakan analisis ragam yang dilanjutkan Uji Beda Nyata Terkecil pada taraf 5%. Hasil penelitian menunjukkan tidak terdapat interaksi nyata antara POC dan NPK pada seluruh variabel pengamatan. Pemberian NPK 150 kg ha⁻¹ merupakan dosis optimal dalam meningkatkan tinggi tanaman, jumlah bintil akar efektif, dan bobot biji kering per tanaman. Sebaliknya, POC berbahan C. glomerata belum memberikan pengaruh nyata terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai.

Soybean is a strategic crop in national food systems; however, its productivity on dryland areas remains constrained by low soil fertility. This study aimed to evaluate the individual and combined effects of liquid organic fertilizer (LOF) and NPK fertilization on soybean growth and yield. The experiment was conducted on dryland from April to July 2024 using a factorial Randomized Block Design with three replications. Treatments consisted of three LOF concentrations (0, 25, and 50 mL L⁻¹) and three NPK rates (0, 150, and 300 kg ha⁻¹). Observed variables included vegetative growth characteristics, effective root nodulation, and yield components such as pod attributes and seed biomass. Data were analyzed using analysis of variance followed by Duncan's Multiple Range Test at a 5% significance level. The results showed no significant interaction between LOF and NPK fertilization across all observed variables. Application of NPK at 150 kg ha⁻¹ optimally enhanced plant height, effective nodulation, and dry seed weight per plant. In contrast, LOF derived from *Cladophora glomerata* did not significantly affect soybean growth or yield. These findings indicate that NPK fertilization remains the primary driver of soybean productivity under dryland

conditions.

LATAR BELAKANG

Kedelai merupakan salah satu komoditas pangan yang sangat strategis dalam menjaga stabilitas pangan Indonesia. Kedelai menjadi sumber protein (35–40%), lemak esensial, vitamin B kompleks, asam folat, isoflavon, dan mineral yang berperan penting bagi manusia (Li et al., 2024). Kedelai dijadikan dalam industri seperti tahu, tempe, kecap, minyak kedelai, bahan baku kosmetik dan farmasi. Sisa biomassa kedelai juga dijadikan sebagai pakan ternak dengan kandungan protein kasar yang relatif tinggi (Luo et al., 2023).

Produksi kedelai masih rendah dan berfluktuasi dalam memenuhi kebutuhan kedelai secara nasional. Badan Pusat Statistik (2024) melaporkan produksi kedelai tahun 2020 sebesar 546,58 ribu ton, tahun 2021 meningkat menjadi 613,32 ribu ton, tahun 2022 turun menjadi 301 ribu ton, tahun 2023 naik menjadi menjadi 340 ribu ton, bahkan tahun 2024 diproyeksikan hanya 370 ribu ton. Hal ini menjadikan Indonesia memiliki ketergantungan terhadap impor kedelai. Kementerian Pertanian Republik Indonesia (2024) melaporkan bahwa, impor kedelai cenderung meningkat. Tahun 2021 mencapai 2,6 juta ton, tahun 2022 menurun menjadi 2,4 juta ton, namun tahun 2023 kembali meningkat 2,7 juta ton. Kedelai di impor dari negara produsen kedelai seperti; Amerika Serikat, Brasil, dan Kanada. Produktivitas kedelai nasional hanya 1,4 sampai 1,6 ton.ha⁻¹, masih jauh di bawah potensi hasil varietas unggul bisa mencapai 2,5 sampai 3,0 ton.ha⁻¹.

Rendahnya produksi kedelai akibat produktivitas yang rendah, selain itu juga akibat pengembangan dedelai di Indonesia yang masih terbatas. Oleh sebab itu perlu dilakukan berbagai strategi untuk meningkatkan produktivitas kedelai, diantaranya pengembangan varietas unggul, penerapan teknologi budidaya berkelanjutan, serta pemanfaatan lahan marginal secara lebih optimal (Tiwari et al., 2024; Li et al., 2024).

Kesuburan tanah yang rendah menjadi salah satu kendala utama dalam pengembangan tanaman kedelai. Setyaningrum et al., (2024) menyatakan bahwa, lahan yang tersedia bagi tanaman kedelai umumnya lahan marginal dengan berbagai faktor pembatas, seperti kandungan bahan organik rendah, reaksi tanah masam (pH rendah) yang dapat menghambat penyerapan hara dan pertumbuhan akar. Hal ini menyebabkan efisiensi pemupukan cenderung menurun, sehingga meningkatkan biaya produksi kedelai. Menurut (Ediwirman et al., 2025), penggunaan pupuk anorganik secara berlebihan dalam jangka panjang tidak hanya menurunkan kesuburan tanah, tetapi juga mengurangi keuntungan petani akibat meningkatnya biaya produksi.

Pupuk anorganik merupakan salah satu sumber hara yang penting bagi tanaman kedelai.

Pupuk anorganik mampu menyediakan hara bagi tanaman secara cepat, namun efisiensinya sangat rendah pada tanah marginal. Pemupukan yang berlebihan dan tidak seimbang dapat menurunkan kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah serta mengurangi efisiensi penyerapan hara dalam jangka panjang (Havlin et al., 2020; (Li et al., 2024). Pupuk anorganik selain menurunkan kesuburan tanah juga menyebabkan tingginya biaya produksi, sehingga kurang memberikan keuntungan bagi petani.

Salah satu strategi yang dapat dilakukan melalui pemanfaatan pupuk organik cair (POC). Pupuk organik cair dikembangkan berbasis biomassa seperti alga. *Cladophora glomerata* merupakan alga hijau berfilamen yang banyak dijumpai di perairan tawar, seperti sungai, danau, serta saluran irigasi. Alga *C. glomerata* memiliki kandungan unsur hara makro dan mikro, senyawa fenolik, serta fitohormon alami yang berperan sebagai biostimulan dalam memperbaiki lingkungan rizosfer serta mendukung pertumbuhan tanaman (Ahmed et al., 2023); (Rahman et al., 2023). POC berbasis alga dapat meningkatkan efisiensi pemupukan anorganik, memperbaiki sifat tanah, serta menekan degradasi lahan marginal (Zhong & Zhong, 2024b); Li et al., 2024). *C. glomerata* yang dijadikan sebagai bahan dasar POC memiliki potensi yang mampu mengurangi ketergantungan pada pupuk anorganik serta mendukung peningkatan produktivitas kedelai secara berkelanjutan (Ahmed et al., 2023; Setyaningrum et al., 2024). Penelitian bertujuan mendapatkan pupuk organik cair *C. glomerata* dan pupuk NPK yang baik terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai.

Metode Pelaksanaan

Penelitian dilaksanakan di lahan kering Kelurahan Kalumbuk, Kecamatan Kuranji, Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat, pada ketinggian ± 10 m di atas permukaan laut (dpl). Penelitian dilakukan dari bulan April sampai Juli 2024. Bahan yang digunakan dalam penelitian; kedelai varietas Anjosmoro, pupuk NPK 15:15:15), pupuk kandang, POC, Matador 25 EC. Peralatan yang digunakan; hand sprayer, gembor, cangkul, meteran, timbangan digital, dan alat tulis.

Rancangan penelitian yang digunakan berupa Rancangan Acak Kelompok (RAK) berpola faktorial dengan tiga kelompok. Faktor pertama adalah konsentrasi POC (ml L^{-1}) terdiri dari; 0, 25, dan 50 ml.l air^{-1} dan faktor kedua pupuk NPK (kg.ha^{-1}) terdiri dari; 0, 150, dan 300 kg.ha^{-1} . Kedua faktor menghasilkan 9 kombinasi perlakuan.

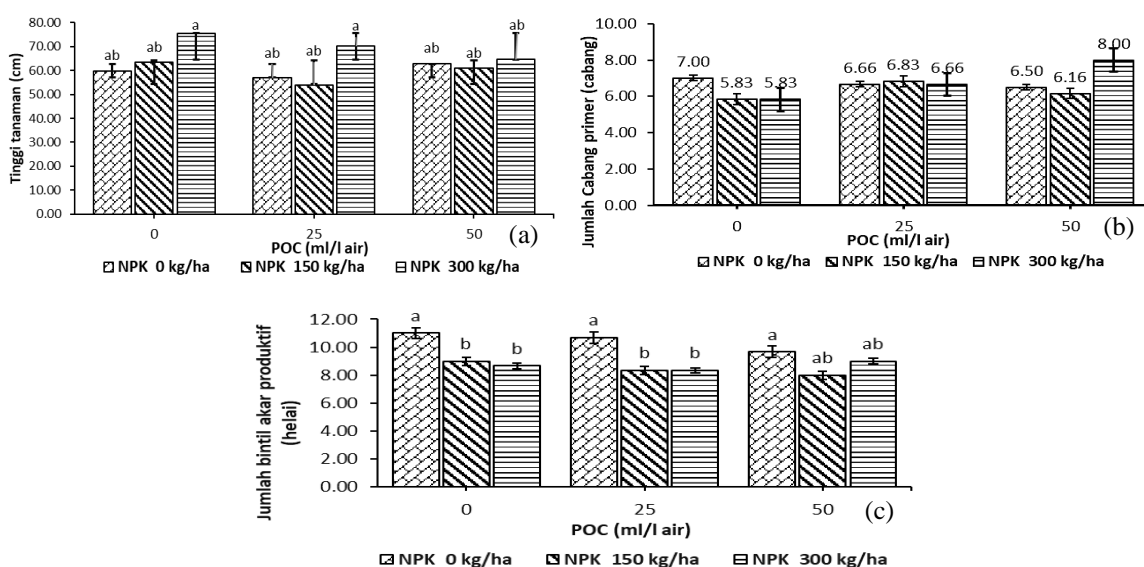
POC disiapkan menurut metode yang dikembangkan oleh Jamilah (2024), POC dibuat alga hijau *C. glomerata*. Air hujan sebanyak 15 liter, alga 1 kg, air kelapa 1 liter, bawang merah 100 g, madu 100 ml, MSG 100 g, kapur sirih 100 g, dan garam 100 g. Alga dan bawang merah dicincang dimasukkan ke dalam ember ditambahkan air kelapa dan bahan lain dan diaduk selama 30 menit. Tutup ember pakai plastik dan difermentasikan 1 minggu untuk fermentasi. Pupuk siap pakai digunakan dengan dengan diencerkan 1:10.

Plot percobaan disiapkan setelah lahan diolah dan dibuat plot berukuran 2 x 2 m. Tanah selanjutnya ditambahkan pupuk kandang 2 kg plot⁻¹ yang diberikan satu minggu sebelum tanam (MST) yang dicampur merata. POC diberikan dimulai 1 MST dengan interval 1 minggu sekali hingga fase pembungaan (total 6-8 kali). POC disemprot pada daun tanaman dan permukaan tanah (volume 500 ml plot⁻¹) yang dilakukan pada pagi hari. Pupuk NPK diberikan 2 kali, 10 hari setelah tanam (hst) dan 30 hst. Pupuk ditabur merata dibarisan tanaman (5-10 cm dari akar). Pemeliharaan tanaman yang dilakukan meliputi; penyiraman yang dilakukan pada sore hari, penyiangan dengan mencabut gulma secara manual, dan pengendalian hama secara kimiawi Matador 25 EC.

Variabel yang diamati dalam penelitian dibagi komponen pertumbuhan (tinggi tanaman cm pada 30, 60, dan 85 hst; jumlah cabang primer; jumlah bintil akar efektif pada 45 hst) dan hasil (jumlah polong per tanaman; persentase polong bernas, persentase polong hampa; bobot biji kering per tanaman g; bobot 100 biji g; bobot biji kering per plot g). Data yang diperoleh dianalisis dengan uji F pada taraf 5%, dilanjutkan dengan Uji Beda Nyata Terkecil (BNT) taraf 5%. Data dianalisis menggunakan software Statistix ver. 8.0.

Hasil dan Pembahasan

Sidik ragam tinggi tanaman, jumlah cabang primer dan jumlah bintil akar produktif tanaman kedelai berinteraksi tidak nyata dengan pemberian POC dan NPK. Pengaruh utama pemberian POC juga tidak berpengaruh nyata, tetapi pengaruh utama dari pemberian NPK berpengaruh nyata pada pertumbuhan tinggi tanaman dan jumlah bintil akar produktif tanaman kedelai. Data disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tinggi tanaman (a), jumlah cabang primer (a), dan jumlah bintil akar produktif

tanaman kedelai dengan pemberian POC dan pupuk NPK

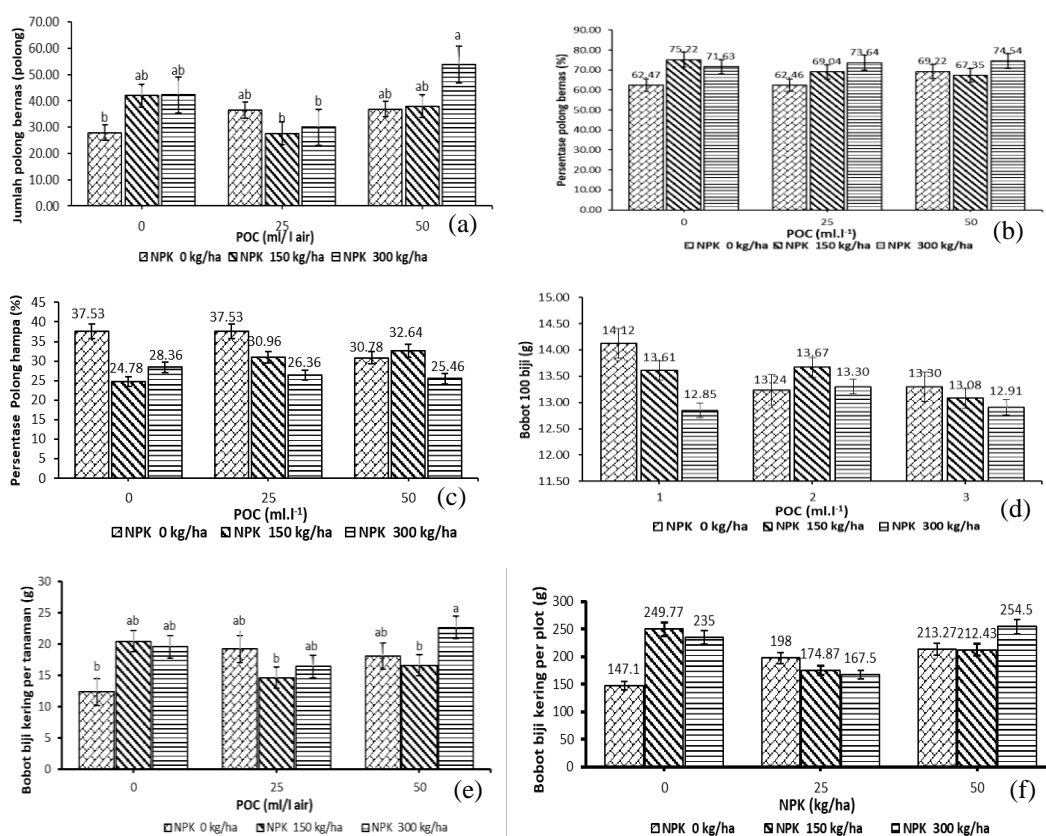
Gambar 1 menunjukkan bahwa, interaksi pemberian NPK dan POC belum mampu meningkatkan pertumbuhan tinggi, jumlah cabang primer dan jumlah bintil akar efektif yang terbentuk, begitu juga dengan POC juga belum memberikan kontribusi. NPK yang diberikan memiliki peranan yang lebih bagi pertumbuhan tanaman kedelai. NPK yang diberikan 0 sampai 150 kg.ha⁻¹ mampu menghasilkan pertumbuhan tinggi yang lebih baik, tetapi dengan peningkatan pemberian NPK 300 kg ha⁻¹ menghasilkan pertumbuhan tinggi yang lebih rendah. NPK yang diberikan 0 kg ha⁻¹ mampu meningkatkan jumlah bintil akar efektif yang terbentuk dibandingkan dengan pemberian NPK 150 sampai 300 kg ha⁻¹. Jumlah cabang primer yang terbentuk dengan pemberian NPK 0 sampai 300 kg ha⁻¹, cabang primer yang terbentuk relatif sama.

NPK dan POC yang diberikan pada tanaman kedelai belum mampu bersinergi bagi pertumbuhan kedelai. Hal ini terjadi karena perbedaan sifat, mekanisme kerja, dan peran fisiologis. NPK memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan dengan POC yang diberikan (Li et al., 2024). NPK memiliki kandungan hara N, P, dan K yang dapat diserap langsung oleh akar, sehingga nampak pada pertumbuhan batang, cabang dan daun tanaman kedelai. Fase awal pertumbuhan, kedelai sangat bergantung pada ketersediaan nitrogen anorganik untuk mendukung pembentukan daun dan batang secara optimal (Havlin et al., 2020; Fageria & Baligar, 2020). POC berfungsi sebagai sumber hara pelepas lambat sebagai biostimulan tanaman dalam memperbaiki lingkungan rizosfer, meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, dan memperbaiki efisiensi serapan hara oleh akar (Ahmed et al., 2023; Rahman et al., 2023).

NPK yang diberikan mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman kedelai, tetapi pada takaran yang tinggi juga dapat menghambat dan menekan pembentukan dan aktivitas bintil akar pada tanaman kedelai. Kedelai adalah salah satu tanaman yang memiliki kemampuan dalam fiksasi N dari udara, sehingga NPK yang diberikan menghasilkan bintil akar efektif yang lebih sedikit. Samekto et al., (2020) ; Li et al., (2024) menyatakan bahwa, nitrogen yang diberikan dosis tinggi dapat menurunkan jumlah dan bobot bintil akar, menghambat aktivitas nitrogenase, serta mempercepat senesens bintil akibat terganggunya keseimbangan fisiologis, termasuk homeostasis besi pada jaringan bintil akar. Lebih lanjut Adjei-Nsiah et al., (2022) menjelaskan bahwa, tanaman mengurangi ketergantungannya terhadap fiksasi nitrogen biologis bila N tersedia dalam jumlah cukup di dalam tanah.

POC atau ekstrak alga tidak selalu meningkatkan pertumbuhan, nodulasi, maupun hasil kedelai, ketika hara sudah relatif mencukupi di dalam tanah. Menurut Zhong & Zhong, (2024a); Krawczuk et al., 2023), tersedianya hara di dalam tanah yang cukup tanaman tidak lagi memberikan respons tambahan terhadap biostimulan karena faktor pembatas utama pertumbuhan telah terpenuhi. POC lebih berperan dalam perbaikan kualitas tanah jangka panjang.

Sidik ragam jumlah polong bernas, persentase polong bernas, persentase polong hampa, bobot 100 biji, bobot biji kering per tanaman, dan bobot biji kering per plot tanaman kedelai akibat pemberian NPK dan POC berinteraksi tidak nyata. Pengaruh utama NPK yang diberikan berpengaruh nyata terhadap jumlah polong bernas dan bobot biji kering per tanaman berpengaruh nyata. Pengaruh utama POC yang diberikan berpengaruh tidak nyata terhadap persentase polong bernas, polong hampa, bobot 100 biji, dan bobot biji kering per plot. Data disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Jumlah polong bernas (a), persentase polong bernas (b), persentase polong hampa (c), bobot 100 biji (d), bobot biji kering per tanaman (e), dan bobot biji kering kering per plot (f) tanaman kedelai dengan pemberian POC dan NPK

Gambar 2 menunjukkan bahwa, interaksi pupuk organik cair (POC) dan pupuk NPK belum memberikan kontribusi nyata terhadap jumlah polong bernas, persentase polong bernas, persentase polong hampa, bobot 100 biji, bobot biji kering per tanaman, dan bobot biji kering per plot tanaman kedelai. NPK yang diberikan 0 sampai 150 kg.ha⁻¹ meningkatkan jumlah polong bernas dan bobot biji kering.tanaman⁻¹, dan diberikan 300 kg.ha⁻¹ terjadi penurunan. POC yang diberikan belum memperlihatkan peranan dalam pembentukan dan pengisian polong kedelai.

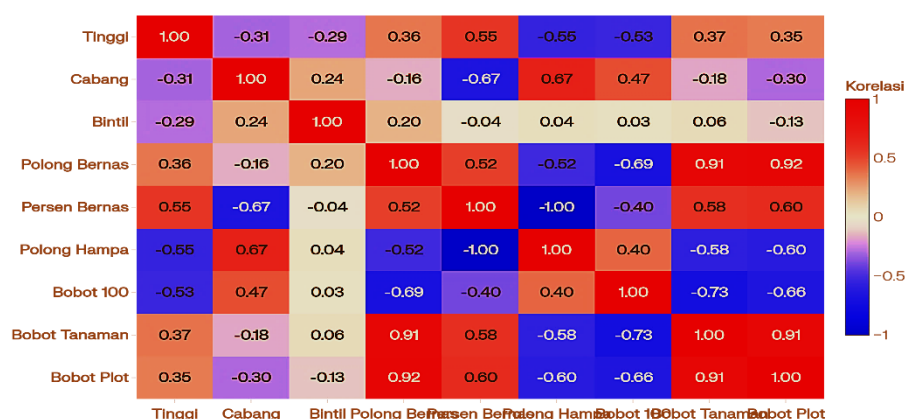
Sinergisitas NPK dan POC yang diberikan belum berkontribusi terhadap pembentukan dan

pengisian polong tanaman kedelai. Hal ini disebabkan perbedaan bentuk, sifat, dan mekanisme kerja NPK dan POC yang diberikan, kesuburan tanah dan faktor genetik tanaman. Menurut Marschner (2020); Havlin et al., (2020); Fageria et al., (2020), hara N, P, dan K yang dikandung pupuk NPK mudah larut dan cepat tersedia bagi tanaman. POC yang diberikan bukan sumber hara utama, tetapi lebih berperan dalam memperbaiki kesuburan tanah melalui aktivitas mikroorganisme dan efisiensi serapan hara. Lebih lanjut Fageria & Baligar, (2020) menyatakan, respons tanaman mengikuti prinsip hasil berkurang (hukum minimum Leibig), penambahan input tidak selalu diikuti peningkatan hasil. Oleh sebab itu terpenuhinya kebutuhan hara N, P, dan K bagi pembentukan biji dan polong kedelai tidak dipengaruhi langsung dari POC yang diberikan. Menurut Taiz et al., (2022); Kumar et al., (2023), faktor genetik juga menjadi faktor pembatas utama pertumbuhan dan hasil kedelai.

Hara N, P, dan K yang diserap tanaman berperan penting pada pembentukan dan pengisian polong tanaman kedelai. Hara N, P, K yang tersedia dibatasi kesuburan tanah baik fisik dan biologi tanah. NPK yang diberikan sebanyak $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sudah mampu memenuhi kebutuhan hara N, P, dan K dalam pembentukan dan pengisian polong kedelai. Menurut Salvagiotti, et al., (2020); Taiz et al., (2022), hara N tidak hanya untuk pembentukan klorofil dan fotosintesis bagi pertumbuhan vegetatif, tetapi juga diperlukan dalam pembentukan dan pengisian polong kedelai. Defisiensi hara N pada tanaman kedelai menyebabkan gugur bunga dan polong muda. Hawkesford et al., (2021) menyatakan bahwa, nitrogen berperan dalam mempertahankan luas dan umur daun selama fase pengisian polong, sehingga proses suplai asimilat ke polong menjadi lebih optimal. Selain N, fosfor merupakan salah satu hara yang esensial dalam pembentukan dan pengisian polong kedelai. Menurut Wang et al., (2020), fosfor penting dalam pembelahan sel dan diferensiasi jaringan pada fase awal generatif seperti pembungaan, pembentukan bakal polong. Lebih lanjut Vance et al., (2021); (Kumar et al., 2023) menjelaskan bahwa, fosfor berpengaruh langsung terhadap jumlah polong bernas dan ukuran biji kedelai. Menurut Chen et al., (2021); Salvagiotti, et al., (2020), kekurangan P pada fase generatif mengakibatkan pembungaan lebih lambat, penurunan jumlah polong bernas, serta pengisian biji tidak optimal sehingga menurunkan hasil kedelai secara keseluruhan. Selain N, P, kalium juga dibutuhkan kedelai dalam proses pengisian biji. Hara K penting dalam proses dalam pembentukan polong dan pengisian biji kedelai. Menurut Zörb et al., (2021), kalium berperan dalam aktivasi enzim, pengaturan osmoregulasi sel, serta pengangkutan asimilat seperti gula dan pati dari daun ke organ generatif dalam pembentukan polong dan pengisian biji kedelai. Lebih lanjut (Fageria & Baligar, 2020) menyatakan bahwa, kalium memperpanjang fase pengisian polong dan meningkatkan terbentuknya polong bernas dan pengisian biji yang lebih sempurna.

Bobot 100 biji, persentase polong bernas dan polong hampa, dan bobot biji kering per plot juga

tidak dipengaruhi oleh NPK dan POC. Bobot 100 biji dipengaruhi oleh faktor genetik. Menurut (Wang et al., 2020), faktor genetik mengontrol aktivitas enzim dalam akumulasi pati dan protein di dalam biji, sehingga menentukan bobot akhir biji kedelai. Persentase polong bernas dan polong hampa dijadikan sebagai salah satu kriteria dalam menentukan pengisian biji yang optimal, namun persentase yang dihasilkan selain dipengaruhi oleh faktor hara, juga akibat faktor lingkungan seperti ketersediaan air. Menurut (Fitriani et al., 2020) dan (Sinaga et al., 2020), persentase pengisian biji kedelai cenderung stabil selama tanaman tidak mengalami cekaman air. (Fernandes et al., 2025) menyatakan bahwa, bahwa faktor genetik dan lingkungan mikro tanaman lebih dominan menentukan persentase polong dibandingkan dengan ketersediaan hara. Bobot biji kering per plot yang dihasilkan tidak dipengaruhi POC dan NPK yang diberikan. Keberhasilan pengisian polong lebih dipengaruhi oleh sifat genetik tanaman serta kondisi lingkungan seperti cahaya dan ketersediaan air dibandingkan peningkatan hara yang diberikan, sehingga persentase polong bernas dan hampa cenderung stabil ((Salvagiotti, et al., 2020); (Kumar et al., 2023); (Taiz et al., 2022). Matrik korelasi antara variabel pengamatan disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Matrik korelasi variabel pengamatan tanaman kedelai pada pemberian POC dan NPK

Gambar 3. menunjukkan bahwa, korelasi sangat kuat antara jumlah polong bernas ($r=0.92$) dan bobot biji per tanaman ($r=0.91$) dengan bobot biji per plot menjadikan kedua variabel ini sebagai penentu utama hasil kedela. Persentase polong bernas ($r=0.60$) memberikan kontribusi positif dan persentase polong hampa (-0.60) serta bobot 100 biji (-0.66) berperan sebagai faktor pembatas yang kuat. Jumlah polong bernas dan bobot biji kering per tanaman juga berkorelasi sangat kuat dengan bobot biji per plot.

Simpulan dan Saran

Berdasarkan penelitian dapat disimpulkan bahwa POC dengan pupuk NPK yang diberikan berinteraksi tidak nyata terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai. Pupuk NPK 150 kg

ha⁻¹ takaran optimal yang mampu meningkatkan pertumbuhan tinggi tanaman, jumlah bintil akar efektif, dan bobot biji kering per tanaman. POC belum berkontribusi nyata terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai.

Referensi

- Adjei-Nsiah, S., Frimpong, F., Owusu Danquah, E., & Abaidoo, R. C. (2022). Nitrogen fertilization effects on nodulation, nitrogen fixation, and yield of soybean (*Glycine max* L.). *Rhizosphere*, 22, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100520>
- Ahmed, M., Hasan, M., Rahman, M. M., & Islam, M. R. (2023). Algal biomass-derived biofertilizers: Composition, soil interaction, and crop productivity enhancement. *Journal of Applied Phycology*, 35(4), 2149–2163. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02941-7>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Tanaman Pangan Indonesia 2020--2024*. BPS Republik Indonesia.
- Chen, X., Cui, Z., Fan, M., & Vitousek, P. (2021). Integrated soil-crop system management for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(3), e2020784118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020784118>
- Ediwirman, E. E., Ermawati, E. E., & Andini, D. D. (2025). The growth and yield response of several maize (*Zea mays* L.) genotypes against the application of bioslurry liquid fertilizer. *Jurnal Agrotek Ummat*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.31764/jau.v12i1.28336>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2020). Nitrogen management in crop production. *Advances in Agronomy*, 163, 1–46.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Heinemann, A. B. (2020). Nutrient uptake and use efficiency in soybean production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(8), 1095–1110. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1744647>
- Fernandes, A. R., Silva, E. C., & Costa, L. M. (2025). Nutrient management strategies to improve legume productivity under marginal soils. *Field Crops Research*, 312, 109456. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109456>
- Fitriani, R., Nurhayati, & Suryadi, A. (2020). Pengaruh pupuk NPK terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 48(2), 123–130.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2020). *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson.
- Hawkesford, M. J., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J. K., Møller, I. M., & White, P. J. (2021). Functions of macronutrients. *Annual Review of Plant Biology*, 72, 557–587.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2024). *Outlook Kedelai Nasional*.
- Krawczuk, A., Wójcik-Gront, E., & Cichy-Szydłowska, K. (2023). Organic fertilizers and soil microorganisms: Implications for nutrient availability and sustainable agriculture. *Soil*

- Systems*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010018>
- Kumar, A., Singh, R., Sharma, P., & Verma, S. (2023). Effects of nutrient management on crop productivity and soil properties. *Agronomy*, 13(5), 1234–1246. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051234>
- Li, X., & others. (2024). Nutrition and utilization of soybean as a protein source and for industry. *Journal of Soybean Research*, XX(XX), XX--XX.
- Li, X., Zhang, Y., Wang, J., & Chen, L. (2024). Integrated nutrient management improves soybean productivity and soil health under marginal land conditions. *Field Crops Research*, 302, 109137. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109137>
- Luo, S., Yu, H., Liu, W., & Zhang, D. (2023). Intercropping systems enhance land use efficiency and yield stability of soybean-based cropping systems. *Agricultural Systems*, 217, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103433>
- Marschner, P. (2020). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (4th ed.). Academic Press.
- Rahman, M. M., Ahmed, M., Hasan, M., & Hossain, M. A. (2023). Seaweed- and algae-based biostimulants: Mechanisms and agronomic benefits. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1189421. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1189421>
- Salvagiotti, Fernando and Cassman, Kenneth G. and Specht, James E. and Walters, Daniel T. and Weiss, Albert and Dobermann, A. (2020). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilization in soybean. *Field Crops Research*, 256, 107912.
- Samekto, R., Widyastuti, S. M., & Kushendarto. (2020). Nitrogen uptake and nodulation response of soybean to inorganic fertilization. *Biodiversitas*, 21(4), 1537–1543. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210421>
- Setyaningrum, R., Prasetyo, B., & Hidayat, R. (2024). Soil fertility constraints and sustainable nutrient management for soybean production in tropical dryland. *Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 21(1), 45–56. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v21i1.74123>
- Sinaga, D., Sitompul, S. M., & Heddy, Y. B. S. (2020). Respons tanaman kedelai terhadap pemupukan nitrogen dan fosfor. *Jurnal Produksi Tanaman*, 8(6), 612–620.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2022). *Plant Physiology and Development* (7th ed.). Sinauer Associates.
- Tiwari, P., Singh, R., & Kumar, S. (2024). *Precision agriculture technologies for sustainable legume production under climate variability*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46864-6_1
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2021). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *Annual Review of Plant Biology*, 72, 557–587. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100307>

- Wang, Y., Lu, J., Ren, T., Hussain, S., Guo, C., Wang, S., Cong, R., & Li, X. (2020). Effects of nitrogen fertilizer on growth, yield and nitrogen use efficiency of soybean. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(6), 1510–1523. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62860-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62860-5)
- Zhong, Y., & Zhong, X. (2024a). Algal-based fertilizers and biostimulants: Advances, challenges, and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140588>
- Zhong, Y., & Zhong, Z. (2024b). Effects of algal-based liquid organic fertilizer on fertilizer efficiency and land degradation. *Sustainable Agriculture*, XX(XX), XX--XX.
- Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2021). Potassium in agriculture--status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 258--259, 153390.