

RESPON FISILOGIS DAN PERTUMBUHAN KEDELAI TERHADAP KOMBINASI AMELIORAN DAN NPK PADA LAHAN SULFAT MASAM JENUH AIR

PHYSIOLOGICAL AND GROWTH RESPONSES OF SOYBEAN TO AMELIORANT AND NPK COMBINATION ON SATURATED ACID SULFATE SOILS

Baaqiy Amri Annisa^{1*}, Nurjani², Nadya Muliandari³

^{1,2,3}Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Indonesia

*Corresponding author email: baaqiy.aa@faperta.untan.ac.id

Abstract. Acid sulfate soils represent suboptimal land with potential for soybean cultivation but are constrained by low soil pH, aluminum toxicity, and limited nutrient availability. This study aimed to analyze the effects of ameliorant combinations and NPK fertilizer composition on soybean growth and physiological responses under saturated soil cultivation. The experiment was conducted on tidal acid sulfate soil using a factorial randomized complete block design with two factors, namely ameliorants (chicken manure and dolomite combinations) and NPK fertilizer compositions. Observed variables included leaf number, leaf area, leaf area index, net assimilation rate, crop growth rate, and leaf area ratio. The results showed that the combination of chicken manure and dolomite improved canopy development and physiological efficiency, indicated by increased leaf area, leaf area index, net assimilation rate, and crop growth rate. Balanced NPK fertilizer composition produced better vegetative growth and physiological stability compared to disproportionate nutrient ratios. These findings indicate that synergistic ameliorant application and balanced nutrient management play an important role in improving photosynthetic efficiency and biomass allocation in soybeans grown on acid sulfate soils under saturated cultivation systems. The study provides scientific support for developing integrated soil fertility management and balanced fertilization strategies to enhance soybean productivity on suboptimal lands.

Keywords: acid sulfate soil; ameliorant; NPK fertilizer; saturated soil cultivation; soybean

Abstrak. Lahan sulfat masam merupakan lahan suboptimal yang berpotensi dikembangkan untuk budidaya kedelai, namun dibatasi oleh kemasaman tanah, toksisitas aluminium, serta rendahnya ketersediaan hara. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi amelioran dan komposisi pupuk NPK terhadap pertumbuhan dan respons fisiologis tanaman kedelai pada sistem budidaya jenuh air. Penelitian dilaksanakan di lahan sulfat masam tipe luapan C menggunakan rancangan acak kelompok lengkap faktorial dengan dua faktor, yaitu amelioran (pupuk kandang ayam dan kombinasi dolomit) dan komposisi pupuk NPK. Variabel pengamatan meliputi jumlah daun, luas daun, indeks luas daun, laju asimilasi bersih, laju pertumbuhan tanaman, dan rasio luas daun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pupuk kandang dan dolomit meningkatkan perkembangan tajuk serta efisiensi fisiologis tanaman melalui peningkatan luas daun, indeks luas daun, laju asimilasi bersih, dan laju pertumbuhan tanaman. Komposisi pupuk NPK yang seimbang menghasilkan pertumbuhan vegetatif dan stabilitas fisiologis yang lebih baik dibandingkan komposisi hara yang tidak proporsional. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sinergi amelioran dan keseimbangan hara berperan penting dalam meningkatkan efisiensi fotosintesis dan distribusi biomassa tanaman pada lahan sulfat masam dengan sistem jenuh air. Hasil penelitian ini bermanfaat sebagai dasar pengembangan teknologi pengelolaan kesuburan tanah dan strategi pemupukan berimbang untuk meningkatkan produktivitas kedelai pada lahan suboptimal.

Kata kunci: amelioran; budidaya jenuh air; kedelai; lahan sulfat masam, pupuk NPK.

PENDAHULUAN

Lahan sulfat masam menjadi peluang sekaligus tantangan bagi pengembangan kedelai di wilayah rawa dan pesisir tropika. Meskipun sistem budidaya jenuh air mampu menekan oksidasi pirit dan mengurangi sebagian kemasaman tanah, kondisi kimia ekstrem seperti pH rendah, toksisitas Al dan Fe, fiksasi fosfor, serta kejenuhan basa rendah masih membatasi pertumbuhan kedelai (Quang *et al.*, 2025). Rendahnya ketersediaan fosfor juga menghambat perkembangan akar dan efektivitas simbiosis penambat nitrogen (Ghulamahdi *et al.*, 2024). Selain itu, pengelolaan air memerlukan presisi tinggi karena fluktuasi muka air dapat memicu oksidasi pirit dan mempercepat pengasaman tanah melalui dinamika redoks kompleks (Mendonça *et al.*, 2021).

Respons pertumbuhan dan hasil kedelai terhadap kombinasi amelioran dan pupuk NPK pada lahan sulfat masam masih menunjukkan variabilitas tinggi. Beberapa penelitian melaporkan peningkatan hasil akibat kombinasi amelioran, NPK, dan input hayati, tetapi peningkatan tersebut sering tidak linier terhadap dosis hara. Pada lahan sulfat masam pasang surut, peningkatan dosis NPK hanya memberikan perbedaan hasil kecil meskipun terjadi perbaikan pH dan penurunan toksisitas aluminium (Maftu'ah *et al.*, 2023). Variasi

pengelolaan air dan biofertilizer pada kondisi muka air berubah juga tidak selalu menghasilkan perbedaan produktivitas (Kinanti *et al.*, 2023). Temuan serupa pada tanah masam non-sulfat menunjukkan bahwa pengurangan dosis NPK masih dapat mempertahankan hasil bila dikombinasikan dengan amelioran (Nurida & Rachman, 2020).

Variabilitas tersebut menunjukkan bahwa hubungan mekanistik antara ameliorasi tanah, pemupukan NPK, dan respons fisiologis kedelai pada kondisi jenuh air belum dipahami secara utuh. Sebagian besar penelitian masih menitikberatkan pada perubahan sifat tanah dan hasil akhir, sementara proses fisiologis seperti laju asimilasi bersih, dinamika biomassa, dan pembentukan tajuk masih jarang dikaji. Perubahan status redoks pada kondisi jenuh air memengaruhi ketersediaan hara, fungsi akar, serta efisiensi pemanfaatan hara tanaman (Muis dkk., 2016), dan interaksi dinamika muka air juga dapat memengaruhi metabolisme tanaman serta respons terhadap perlakuan (Michael, 2020).

Penelitian terkini mulai mengarah pada integrasi amelioran, pupuk NPK, dan pengelolaan air sebagai strategi terpadu. Kombinasi biofertilizer dan NPK menunjukkan peningkatan efisiensi pemanfaatan hara dengan produktivitas

yang relatif setara pada dosis lebih rendah. Pendekatan serupa pada rehabilitasi lahan sulfat masam menekankan penggunaan amelioran berbasis Ca–Mg bersama pupuk majemuk dan input hayati untuk memperbaiki sifat kimia tanah dan mendukung budidaya kedelai (Subiksa et al., 2024). Penelitian pada tanah masam dan terdegradasi juga menunjukkan bahwa kapur, biochar, dan bahan organik dapat meningkatkan efisiensi NPK dan produktivitas tanaman (Wu *et al.*, 2024), meskipun kajian mendalam terkait efisiensi pertumbuhan kedelai pada sistem budidaya jenuh air masih terbatas.

Berdasarkan uraian tersebut, perlu dilakukan kajian mendalam mengenai pengaruh berbagai komposisi amelioran dan variasi komposisi pupuk NPK terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai pada lahan sulfat masam dengan penerapan sistem budidaya jenuh air. Penelitian ini diharapkan mampu menunjukkan hasil analisis pertumbuhan tanaman kedelai pada kondisi lahan sub-optimal, serta mendukung peningkatan produksi kedelai secara berkelanjutan melalui rekayasa fisiologi tanaman.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berlangsung dari bulan Juli hingga Oktober di lahan penelitian Golden River Camp, Desa Kalimas, Kecamatan Sungai Kakap,

Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat. Lokasi penelitian berada pada lahan sulfat masam dengan ketinggian ± 1 meter di atas permukaan laut (mdpl) dan termasuk ke dalam tipe luapan C.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi cangkul, meteran, tali rafia, timbangan digital, penggaris, oven, dan leaf area meter. Bahan yang digunakan terdiri atas benih kedelai varietas Gepak Kuning (deskripsi varietas tercantum pada Lampiran 1), pupuk kandang ayam sebagai bahan amelioran, pupuk NPK majemuk dengan komposisi 16:16:16, 20:10:10, dan 9:25:25, serta bahan pendukung berupa Furadan 3G, fungisida 70 WP, dan insektisida dengan formulasi emulsifiable concentrate (EC).

Penelitian ini menggunakan metode percobaan lapang dengan rancangan acak kelompok lengkap faktorial (RAKL faktorial) yang terdiri atas dua faktor perlakuan. Faktor pertama adalah pemberian pupuk kandang ayam dan Faktor kedua adalah komposisi pupuk NPK.

Variabel pengamatan

- a. Jumlah daun : jumlah daun diukur dengan menghitung seluruh daun trifoliolate kedelai pada umur 50 Hari
- b. Luas daun: Luas daun diukur menggunakan metode analisis citra digital dan dianalisis menggunakan bantuan perangkat lunak ImageJ.

c. pengukuran luas daun dihitung saat tanaman berumur 50 hari.

d. Indeks luas daun :

Indeks luas daun (ILD) dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$ILD = \frac{\sum L_d}{L_t}$$

keterangan:

$\sum L_d$ = total luas daun tanaman per satuan lahan (cm² atau m²)

L_t = luas permukaan tanah yang ditempati tanaman (cm² atau m²)

e. Laju Asimilasi Bersih

Laju asimilasi bersih (LAB) dihitung menggunakan persamaan:

$$LAB = \frac{(W_2 - W_1)}{(t_2 - t_1)} \times \frac{(\ln L_2 - \ln L_1)}{(L_2 - L_1)}$$

keterangan:

W_1 = bobot kering tanaman pada waktu pengamatan awal (t_1)

W_2 = bobot kering tanaman pada waktu pengamatan akhir (t_2)

L_1 = luas daun pada waktu pengamatan awal (t_1)

L_2 = luas daun pada waktu pengamatan akhir (t_2)

t_1 = Umur tanaman kedelai 35 HST

t_2 = Umur tanaman kedelai 50 HST

ln = logaritma natural

f. Laju Pertumbuhan Tanaman

Laju pertumbuhan tanaman (CGR) dihitung menggunakan persamaan:

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{(t_2 - t_1) \times A}$$

keterangan:

W_1 = bobot kering tanaman pada waktu pengamatan awal

W_2 = bobot kering tanaman pada waktu pengamatan akhir

t_1 = Umur tanaman kedelai 35 HST

t_2 = Umur tanaman kedelai 50 HST

A = luas permukaan tanah yang ditempati tanaman atau petak

g. Rasio Luas Daun

$$LAR = \frac{L}{W}$$

keterangan:

L = luas daun total tanaman (cm² atau m²)

W = bobot kering total tanaman (g)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pertumbuhan vegetatif kedelai yang ditunjukkan melalui jumlah daun, luas daun, dan indeks luas daun (Tabel 1) memperlihatkan pola yang searah, di mana peningkatan jumlah daun diikuti oleh peningkatan luas dan indeks luas daun. Pemberian amelioran yang dikombinasikan dengan dolomit menghasilkan pertumbuhan vegetatif lebih baik dibandingkan amelioran tunggal karena mampu memperbaiki sifat kimia tanah, meningkatkan pH, dan ketersediaan hara. Pada komposisi pupuk NPK, keseimbangan unsur nitrogen, fosfor, dan kalium terbukti lebih mendukung perkembangan tajuk tanaman,

sedangkan ketidakseimbangan komposisi hara cenderung menurunkan pertumbuhan vegetatif.

Tabel 1. Jumlah Daun, Luas Daun, dan Indeks Luas Daun Tanaman Kedelai Umur 35 HST

Perlakuan	Jumlah Daun	Luas Daun (cm ²)	Indeks Luas Daun
Amelioran (A)			
Pukan 10 ton/ha	36,22	1754,66	2,19
Pukan 5 ton/ha+ dolomit 2 ton/ha	48,56	2593,01	3,24
Pukan 10 ton/ha + dolomit 1 ton/ha	41,89	2279,20	2,85
BNJ 5%	tn	tn	tn
Komposisi Pupuk NPK			
16:16:16	43,89	2385,06	2,98
20:10:10	43,44	2315,63	2,89
9:25:25	39,33	1926,18	2,41
BNJ 5%	tn	tn	tn

Keterangan : Bilangan yang didampingi huruf yang sama pada kolom sama menunjukkan tidak berbeda nyata, berdasarkan uji BNJ (Beda Nyata Jujur) 5%, tn: Tidak Nyata.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi amelioran organik dan dolomit mampu meningkatkan perkembangan tajuk dan ekspansi daun kedelai pada tanah masam melalui peningkatan pH tanah, penurunan aluminium dapat tukar (Al-dd), serta peningkatan ketersediaan hara dan kapasitas tukar kation. Dolomit berperan menyediakan kalsium dan magnesium untuk menetralkan kemasaman tanah dan mengurangi toksisitas Al³⁺, sedangkan bahan organik meningkatkan retensi hara serta ketersediaan nitrogen dan fosfor yang mendukung pembentukan jaringan daun dan aktivitas fotosintesis (Lauricella *et al.*, 2020). Hasil ini sejalan dengan laporan (Lubis *et al.*, 2021) serta konsep ameliorasi terpadu yang menunjukkan bahwa kombinasi bahan organik dan kapur lebih

efektif meningkatkan pertumbuhan vegetatif dibandingkan aplikasi tunggal, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara dan pembentukan kanopi tanaman pada budidaya kedelai di tanah masam (Mutammimah *et al.*, 2020).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi pupuk NPK yang seimbang menghasilkan jumlah daun, luas daun, dan perkembangan tajuk kedelai yang lebih baik dibandingkan komposisi hara yang tidak proporsional. Hal ini karena nitrogen berperan dalam pembentukan klorofil dan peningkatan fotosintesis, fosfor mendukung pembelahan serta ekspansi sel daun, dan kalium mengatur pembukaan stomata, transport fotosintat, serta metabolisme nitrogen, sehingga ketidakseimbangan hara dapat menurunkan efisiensi pertumbuhan tajuk (Qiang *et al.*,

2023). Hasil ini sejalan dengan laporan bahwa rasio NPK seimbang mampu meningkatkan jumlah daun, kandungan klorofil, dan biomassa tajuk, sehingga pendekatan pemupukan berbasis keseimbangan hara penting untuk mendukung pembentukan kanopi yang produktif, terutama pada tanah masam yang umumnya memiliki keterbatasan hara esensial (Shaaibu & Rabi, 2023).

Hasil penelitian menunjukkan adanya titik optimum kombinasi amelioran dan pupuk NPK dalam meningkatkan pertumbuhan vegetatif kedelai pada tanah sulfat masam melalui peningkatan pH, penurunan aluminium dapat tukar, serta peningkatan kapasitas tukar kation yang mendukung ketersediaan dan efisiensi serapan hara. Kombinasi pupuk kandang $2,5 \text{ t ha}^{-1}$, dolomit setara 20% kejenuhan Al, serta pemupukan 45 kg N, 72 kg P_2O_5 , dan 60 kg $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$ terbukti meningkatkan pertumbuhan dan hasil kedelai, namun peningkatan dosis bahan organik di atas tingkat tersebut tidak lagi memberikan respons nyata, sehingga menunjukkan adanya batas efisiensi pemanfaatan input (Wijanarko *et al.*, 2016). Temuan lain menunjukkan bahwa penggunaan biofertilizer dengan 50% dosis NPK rekomendasi dapat menghasilkan produktivitas hampir setara dengan 150% NPK, menandakan bahwa perbaikan

kondisi tanah mampu meningkatkan efisiensi pemupukan (Harsono *et al.*, 2021). Hal ini sejalan dengan hukum hasil berkurang, di mana penambahan pupuk hanya efektif hingga batas tertentu sebelum efisiensinya menurun, sehingga integrasi jenis dan dosis amelioran dengan komposisi NPK yang tepat berpotensi meningkatkan efisiensi hara, menekan biaya pemupukan, dan mendukung pengelolaan lahan sulfat masam secara lebih adaptif.

Respon fisiologis tanaman melalui laju asimilasi bersih, laju pertumbuhan tanaman, dan rasio luas daun akibat perlakuan amelioran serta komposisi pupuk NPK ditunjukkan oleh Tabel 2 memperlihatkan bahwa terdapat hubungan yang saling berkaitan, di mana peningkatan asimilasi diikuti oleh peningkatan pertumbuhan dan distribusi biomassa daun. Kombinasi amelioran organik dan dolomit pada proporsi tertentu menghasilkan respons fisiologis terbaik karena mampu memperbaiki sifat kimia tanah dan meningkatkan ketersediaan kation basa sehingga fotosintesis dan alokasi hasil asimilasi menjadi lebih efisien. Pada komposisi pupuk NPK, rasio hara yang seimbang menghasilkan laju asimilasi dan pertumbuhan tanaman yang lebih stabil serta rasio luas daun yang lebih tinggi, sedangkan ketidakseimbangan hara cenderung menurunkan efisiensi

pemanfaatan hasil fotosintesis. Secara umum, efisiensi fisiologis tanaman sangat dipengaruhi oleh keselarasan antara perbaikan media tumbuh dan keseimbangan hara, yang berperan dalam mengoptimalkan kapasitas fotosintesis dan distribusi

biomassa daun.. Ketiga parameter menunjukkan pola respons yang saling terkait, sehingga perubahan pada proses asimilasi tercermin langsung pada dinamika pertumbuhan dan distribusi biomassa daun.

Tabel 2. Laju Asimilasi Bersih, Laju Pertumbuhan Tanaman, dan Rasio Luas Daun Kedelai pada Budidaya Jenuh Air di Lahan Sulfat Masam.

Perlakuan	Laju Asimilasi Bersih	Laju Pertumbuhan Tanaman	Rasio Luas Daun
Amelioran (A)			
Pukan10 ton/ha	0,00036	0,00096	145,39
Pukan 5 ton/ha+ dolomit 2 ton/ha	0,00048	0,00140	127,16
Pukan 10 ton/ha + dolomit 1 ton/ha	0,00027	0,00093	166,29
BNJ 5%	tn	tn	tn
Komposisi Pupuk NPK			
16:16:16	0,00048	0,00120	147,94
20:10:10	0,00035	0,00093	122,54
9:25:25	0,00028	0,00117	168,36
BNJ 5%	tn	tn	tn

Keterangan : Bilangan yang didampingi huruf yang sama pada kolom sama menunjukkan tidak berbeda nyata, berdasarkan uji BNJ (Beda Nyata Jujur) 5%, tn: Tidak Nyata.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi amelioran organik dan dolomit meningkatkan efisiensi fisiologis kedelai melalui peningkatan laju asimilasi bersih dan pertumbuhan tanaman pada tanah masam. Dolomit berperan meningkatkan pH tanah dan menurunkan aluminium dapat ditukar (Al-dd) sehingga memperbaiki lingkungan perakaran dan meningkatkan penyerapan Ca dan Mg yang penting bagi aktivitas enzim dan pembentukan jaringan tanaman (Rahman *et al.*, 2020); Asie *et al.*, 2025). Sementara itu,

amelioran organik meningkatkan bahan organik tanah, kapasitas tukar kation, serta ketersediaan N, P, dan K yang mendukung pembentukan klorofil dan fotosintesis. Sinergi kedua amelioran tersebut memperbaiki sifat kimia tanah dan meningkatkan luas daun efektif yang berkontribusi terhadap peningkatan NAR.

Temuan ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa aplikasi dolomit pada tanah gambut terdegradasi mampu meningkatkan kandungan klorofil dan nilai NAR

kedelai, serta kombinasi bahan organik dan biochar pada tanah masam dapat meningkatkan aktivitas fotosintesis dan biomassa tanaman (Nguí *et al.*, 2024). Peningkatan NAR menunjukkan bahwa tanaman lebih efisien mengasimilasi karbon untuk pembentukan biomassa sehingga pertumbuhan vegetatif berlangsung lebih cepat. Oleh karena itu, integrasi amelioran organik dan dolomit berpotensi menjadi strategi efektif dalam meningkatkan performa fisiologis kedelai pada tanah masam, terutama pada fase pertumbuhan awal yang sensitif terhadap ketersediaan hara dan kondisi kimia tanah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa keseimbangan komposisi hara NPK lebih menentukan kestabilan laju asimilasi dan pertumbuhan kedelai dibandingkan dominasi satu unsur, karena tanaman memerlukan proporsi hara yang relatif tetap untuk mendukung metabolisme dan pembentukan biomassa (Jiang *et al.*, 2019). Unsur N dan P berperan dalam pembentukan protein dan energi, sedangkan K berfungsi mengatur keseimbangan air dan aktivitas enzim, sehingga ketidakseimbangan hara dapat menghambat fotosintesis dan distribusi fotosintat (Bender *et al.*,

2015). Hal ini didukung penelitian yang menunjukkan bahwa kekurangan salah satu unsur N, P, atau K menurunkan pertumbuhan dan hasil tanaman, serta respons optimal nutrisi terjadi ketika unsur diberikan secara seimbang ((Ghani *et al.*, 2023; Huynh *et al.*, 2025). Selain itu, ketidakseimbangan hara juga dapat mengganggu mikrobioma rizosfer dan menurunkan produktivitas tanaman dalam jangka panjang (Wang *et al.*, 2024). Temuan ini sesuai dengan hukum minimum Liebig yang menegaskan bahwa pertumbuhan tanaman ditentukan oleh unsur hara yang paling terbatas, sehingga pemupukan berimbang penting untuk menjaga stabilitas fotosintesis, pembentukan biomassa, dan perkembangan tanaman.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa keseimbangan antara laju pertumbuhan tanaman dan rasio luas daun (LAR) pada kedelai di tanah masam mencerminkan strategi alokasi biomassa untuk menyeimbangkan penangkapan cahaya dan efisiensi fotosintesis. Peningkatan LAR pada fase awal dapat memperluas permukaan daun dan meningkatkan fotosintesis, namun tekanan tanah masam seperti toksisitas aluminium dan rendahnya ketersediaan

hara dapat menurunkan pembentukan daun sehingga pertumbuhan tanaman terhambat (Malede *et al.*, 2020). Sebaliknya, LAR yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penebaran kanopi dan menurunkan efisiensi fotosintesis, sehingga pertumbuhan dan hasil tanaman hanya meningkat hingga batas optimum (Raza *et al.*, 2022). Pengurangan luas daun secara terkendali bahkan dapat meningkatkan pembentukan polong melalui perbaikan kualitas cahaya dan pengalihan biomassa ke organ reproduktif (Quijano & Morandi, 2023). Pada kondisi tanah masam, tanaman cenderung menyeimbangkan alokasi biomassa antara daun, akar, dan organ reproduktif, sehingga perbaikan kondisi tanah dan pengelolaan kanopi menjadi penting untuk menjaga stabilitas pertumbuhan kedelai (Sattar *et al.*, 2023).

KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi amelioran organik dan dolomit serta komposisi pupuk NPK yang seimbang mampu meningkatkan performa pertumbuhan vegetatif dan efisiensi fisiologis tanaman kedelai pada lahan

sulfat masam dengan sistem budidaya jenuh air. Sinergi amelioran terbukti memperbaiki kondisi kimia tanah sehingga mendukung perkembangan tajuk, ekspansi daun, serta peningkatan laju asimilasi bersih dan laju pertumbuhan tanaman. Selain itu, keseimbangan rasio hara N, P, dan K berperan penting dalam menjaga stabilitas proses fotosintesis, distribusi biomassa, dan efisiensi pembentukan kanopi tanaman. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa pengelolaan lahan sulfat masam memerlukan pendekatan terpadu melalui formulasi kombinasi amelioran dan pemupukan berimbang untuk mendukung analisis pertumbuhan tanaman kedelai dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara pada kondisi lahan suboptimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universitas Tanjungpura atas pendanaan penelitian ini di bawah program Hibah Penelitian DIPA 2025 (Nomor: 2390/UN22.3/PT.01.03/2025).

DAFTAR PUSTAKA

- Asie, E., Rumbang, N., Chotimah, H., Darung, U., Saputra, M., Yurisinthae, E., & Nurmayulis, N. (2025). Improvement in chemical properties of degraded peatlands, physiological characteristics, and soybean yield using dolomite. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.124.8235>
- Bender, R., Haegele, J., & Below, F. (2015). Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern Soybean Varieties. *Agronomy Journal*, 107, 563–573. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0435>
- Ghani, A., Omar, S., Jolánkai, M., Tarnawa, Á., Khalid, N., Kassai, M., & Kende, Z. (2023). Response of Shoot and Root Growth, Yield, and Chemical Composition to Nutrient Concentrations in Soybean Varieties Grown under Soilless and Controlled Environment Conditions. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101925>
- Harsono, A., Sucahyono, D., Pratiwi, E., Sarjia, A., Pratiwi, H., Andreas, D., & Simarmata, T. (2021). The effectiveness of technology packages of 15 biofertilizer formulas to increase soybean productivity on acidic soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 911. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/911/1/012041>
- Huynh, K. A., Jolánkai, M., Kassai, M., Kovács, G., Gyuricza, C., & Balázs, L. (2025). Influence of Light Intensity and Nutrient Concentration on Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Seedling Growth. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051037>
- Jiang, W., Liu, X., Wang, X., & Yin, Y. (2019). Characteristics of Yield and Harvest Index, and Evaluation of Balanced Nutrient Uptake of Soybean in Northeast China. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060310>
- Lauricella, D., Butterly, C., Clark, G., Sale, P., Li, G., & Tang, C. (2020). Effectiveness of innovative organic amendments in acid soils depends on their ability to supply P and alleviate Al and Mn toxicity in plants. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 3951–3962. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02721-0>
- Lubis, K., Hanum, H., & Aulia, G. (2021). The effect of biofertilizer, chicken manure and dolomite on chemical soil and the growth of soybean at potential acid sulphate soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 782. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/782/4/042035>
- Malede, M., Abate, B., & Amogne, A. (2020). The effect of soil acidity on some growth-related traits of soybean genotypes. *International Journal of Research in Agronomy*. <https://doi.org/10.33545/2618060x.2020.v3.i2a.36>
- Mutammimah, U., Minardi, S., & Suryono, S. (2020). Organic amendments effect on the soil chemical properties of marginal

- land and soybean yield. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 7, 2263–2268. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2020.074.2263>
- Ngui, M., Lin, Yong-Hong, Wei, I.-L., Wang, C.-C., Xu, Y.-Z., & Lin, Ying-Hong. (2024). Effects of the combination of biochar and organic fertilizer on soil properties and agronomic attributes of soybean (*Glycine max* L.). *PLOS ONE*, 19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310221>
- Qiang, B., Zhou, W., Zhong, X., Fu, C., Cao, L., Zhang, Y., & Jin, X. (2023). Effect of nitrogen application levels on photosynthetic nitrogen distribution and use efficiency in soybean seedling leaves. *Journal of Plant Physiology*, 287, 154051. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2023.154051>
- Quijano, A., & Morandi, E. (2023). Leaf area reduction during the pod set period changes the photomorphogenic light balance and increases the pod number and yield in soybean canopies. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109148>
- Rahman, F. A., Nugroho, B., Sutandi, A., & Sudadi, U. (2020). Spesiasi Aluminium Terlarut dan Sifat Kimia Ultisol yang Diameliorasi dengan Dolomit dan Lignit-Teraktivasi. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 26, 42–49. <https://doi.org/10.18343/jipi.26.1.42>
- Raza, M., Gul, H., Hasnain, A., Khalid, M., Hussain, S., Abbas, G., Ahmed, W., Babar, M. J., Ahmed, Z., Saeed, A., Riaz, M., Khan, A., Kakar, K., Ercişli, S., Sabah, A. El, Qin, R., Ahmad, S., Feng, Y., & Yang, W. (2022). Leaf Area Regulates the Growth Rates and Seed Yield of Soybean (*Glycine max* L. Merr.) in Intercropping System. *International Journal of Plant Production*, 16, 639–652. <https://doi.org/10.1007/s42106-022-00201-8>
- Sattar, M., Raza, A., Ali, S., Bashir, S., Kanwal, F., Khan, I., Raza, M., Hussain, S., & Shen, F. (2023). Integrating by-products from bioenergy technology to improve the morpho-physiological growth and yield of soybean under acidic soil. *Chemosphere*, 138424. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138424>
- Shaaibu, H., & Rabi, H. (2023). EFFECTS OF NPK AND POULTRY MANURE RATES ON GROWTH PERFORMANCE AND YIELD OF SOYBEAN (*Glycine max* L. Merrill). *FUDMA JOURNAL OF SCIENCES*. <https://doi.org/10.33003/fjs-2023-0705-1228>
- Wang, M., Ge, A., Xingzhu, Wang, X., Xie, Q., Wang, L., Song, X., Jiang, M., Yang, W., Murray, J., Wang, Y., Liu, H., Cao, X., & Wang, E. (2024). Dynamic root microbiome sustains soybean productivity under unbalanced fertilization. *Nature Communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45925-5>

Wijanarko, A., Taufik, A., & Harnowo, D. (2016). Effect of liming, manure, and NPK fertilizer application on growth and yield performance of soybean in swamp land. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 3, 527–533. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2016.032.527>