

Integrasi Rasio Kesetaraan Lahan, Efisiensi Nitrogen, dan Efisiensi Radiasi pada Tumpangsari Jagung–Kedelai untuk Intensifikasi Ekologis Berkelanjutan

Integration of Land Equivalent Ratio, Nitrogen Use Efficiency, and Radiation Use Efficiency in Maize–Soybean Intercropping for Sustainable Ecological

Meko Gustian ^{1*}, Rizky Septika Utami ¹

¹Program Studi Agroteknologi, Universitas Pat Petulai, Indonesia

*Corresponding author's e-mail: mekogustian102@gmail.com

Article Info	Abstrak
<p><i>Article History:</i> Diterima : 04/02/2026 Direvisi : 10/02/2026 Diterima : 21/02/2026 Diterbitkan : 25/02/2026</p> <p>Kata Kunci: Efisiensi Nitrogen; Efisiensi Radiasi; Intensifikasi Ekologis; Rasio Kesetaraan Lahan; Tumpangsari Jagung–Kedelai</p>	<p>Penelitian ini bertujuan mengevaluasi sistem tumpangsari jagung–kedelai dalam meningkatkan efisiensi penggunaan lahan dan produktivitas total melalui pendekatan intensifikasi ekologis. Keterbatasan lahan pertanian dan tingginya ketergantungan terhadap pupuk nitrogen sintesis menuntut sistem budidaya yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian dilaksanakan menggunakan Rancangan Acak Kelompok dengan enam perlakuan, terdiri atas sistem monokultur dan beberapa variasi proporsi tumpangsari substitusi serta aditif. Parameter utama yang dianalisis meliputi Rasio Kesetaraan Lahan (Land Equivalent Ratio/LER), Efisiensi Penggunaan Nitrogen (Nitrogen Use Efficiency/NUE), dan Efisiensi Penggunaan Radiasi (Radiation Use Efficiency/RUE). Data dianalisis menggunakan ANOVA pada taraf 5% dan dilanjutkan dengan uji DMRT. Hasil menunjukkan bahwa seluruh sistem tumpangsari memiliki nilai LER > 1, dengan nilai tertinggi pada sistem aditif (1,42), yang menunjukkan peningkatan efisiensi lahan sebesar 42% dibandingkan monokultur. Sistem tumpangsari juga meningkatkan NUE dan RUE secara signifikan, terutama pada proporsi kedelai yang lebih tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi sereal–legum mampu meningkatkan produktivitas melalui komplementaritas ekologis dan efisiensi sumber daya.</p>
<p></p> <p>This article is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.</p>	<p>Abstract</p> <p><i>This study aimed to evaluate the maize–soybean intercropping system in improving land-use efficiency and total productivity through an ecological intensification approach. Limited agricultural land and the high dependence on synthetic nitrogen fertilizers require more efficient and sustainable cropping systems. The experiment was conducted using a Randomized Block Design with six treatments consisting of monoculture systems and several variations of substitution and additive intercropping proportions. The main parameters analyzed included Land Equivalent Ratio (LER), Nitrogen Use Efficiency (NUE), and Radiation Use Efficiency (RUE). Data were analyzed using ANOVA at the 5% significance level followed by Duncan’s Multiple Range Test (DMRT). The results showed that all intercropping systems had LER values greater than 1, with the highest value observed in the additive system (1.42), indicating a 42% increase in land-use efficiency compared with monoculture. The intercropping systems also significantly improved NUE and RUE, particularly in treatments with higher soybean proportions. These findings confirm that cereal–legume integration can enhance productivity through ecological complementarity and improved resource-use efficiency.</i></p>

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini (APA 7th Style):

Gustian, M., & Utami, R. S. (2026). Integrasi Rasio Kesetaraan Lahan, Efisiensi Nitrogen, dan Efisiensi Radiasi pada Tumpangsari Jagung–Kedelai untuk Intensifikasi Ekologis Berkelanjutan. *Minagro: Jurnal Agronomi*, 1(1), 25–35. <https://doi.org/xxxxxx/xxxxxx>

Pendahuluan

Pertanian global menghadapi tekanan multidimensional yang semakin kompleks akibat pertumbuhan populasi, perubahan iklim, degradasi lahan, serta keterbatasan sumber daya alam. Proyeksi kebutuhan pangan hingga tahun 2050 menunjukkan bahwa produksi harus meningkat secara signifikan untuk memenuhi kebutuhan populasi yang mendekati 10 miliar jiwa, sementara ekspansi lahan pertanian semakin terbatas dan berpotensi mempercepat degradasi ekosistem (Ziadat et al., 2025; Simane et al., 2025; Yuan et al., 2024). Bukti ilmiah menunjukkan bahwa perubahan iklim, kekeringan ekstrem, serta gangguan sistem hidrologi pertanian meningkatkan risiko penurunan produktivitas dan ketidakstabilan hasil panen di berbagai wilayah (Maestre et al., 2025; Jain et al., 2024). Kondisi tersebut menuntut penerapan intensifikasi berkelanjutan yang mampu meningkatkan hasil tanpa memperluas lahan dan tanpa menurunkan kualitas lingkungan. Dalam konteks nasional, sektor pertanian berperan penting dalam menjaga ketahanan pangan dan stabilitas ekonomi, khususnya melalui komoditas jagung dan kedelai sebagai sumber utama karbohidrat dan protein nabati. Meskipun kontribusinya signifikan, peningkatan produktivitas kedua komoditas ini masih menghadapi kendala efisiensi penggunaan lahan dan tingginya ketergantungan terhadap pupuk nitrogen sintetis. Penggunaan nitrogen secara intensif meningkatkan biaya produksi dan berisiko mencemari lingkungan melalui pencucian nitrat serta emisi gas rumah kaca (Mesele et al., 2025; Ahmed et al., 2025). Ketergantungan terhadap input eksternal yang berlebihan juga dapat mempercepat degradasi tanah dan menurunkan keberlanjutan sistem produksi dalam jangka panjang (Kopitke et al., 2025; Yuan et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan strategi pengelolaan hara yang lebih efisien serta pendekatan agroekologi yang mampu menjaga produktivitas sekaligus keberlanjutan lingkungan.

Sistem tumpangsari antara tanaman serealia dan legum berkembang sebagai salah satu strategi yang relevan dalam pertanian berkelanjutan. Integrasi jagung sebagai tanaman C4 dengan kedelai sebagai tanaman legum C3 memungkinkan terjadinya komplementaritas relung ekologi dan diferensiasi kanopi yang meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya (Li et al., 2023; Yu et al., 2022). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa sistem serealia dan legum mampu meningkatkan produktivitas total lahan melalui optimalisasi pemanfaatan cahaya, air, dan hara, serta melalui kontribusi fiksasi nitrogen biologis yang meningkatkan ketersediaan nitrogen dalam sistem tanah dan tanaman (Raza et al., 2021; Kermah et al., 2019). Pendekatan ini sejalan dengan konsep intensifikasi ekologis yang menekankan optimalisasi proses biologis dan interaksi antarspesies untuk meningkatkan produksi secara berkelanjutan. Evaluasi sistem tumpangsari secara ilmiah memerlukan indikator kuantitatif berbasis efisiensi. Rasio Kesetaraan Lahan atau Land Equivalent Ratio digunakan secara luas untuk mengukur keunggulan produktivitas tumpangsari dibandingkan monokultur (Li et al., 2020; Yu et al., 2022). Namun peningkatan nilai LER belum sepenuhnya menjelaskan mekanisme fisiologis dan ekologis yang mendasari peningkatan tersebut, khususnya terkait dinamika serapan nitrogen dan distribusi radiasi dalam kanopi campuran (Raza et al., 2021). Oleh karena itu diperlukan integrasi indikator tambahan seperti Nitrogen Use Efficiency dan Radiation Use Efficiency untuk memperoleh pemahaman sistemik berbasis proses biofisik.

Efisiensi nitrogen menjadi fokus penting karena nitrogen merupakan unsur hara esensial sekaligus sumber emisi nitrous oxide apabila tidak dimanfaatkan secara optimal (Chen et al., 2024; Raza et al., 2021). Di sisi lain, efisiensi penggunaan radiasi menentukan kemampuan tanaman mengonversi energi matahari menjadi biomassa, terutama dalam sistem agroekosistem tropis dengan intensitas cahaya tinggi (Li et al., 2023; Yu et al., 2022). Integrasi LER, NUE, dan RUE dalam satu kerangka analisis memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap efisiensi lahan, hara, dan energi dalam sistem tumpangsari modern. Permasalahan utama dalam pengembangan sistem tumpangsari jagung dan kedelai terletak pada belum terintegrasinya evaluasi efisiensi lahan, nitrogen, dan radiasi dalam satu kerangka analisis eksperimental. Variasi proporsi tanam berpotensi memengaruhi tingkat komplementaritas dan kompetisi antarspesies sehingga berdampak pada LER, NUE, dan RUE secara simultan. Pemahaman komprehensif mengenai hubungan ketiga indikator tersebut masih terbatas dalam literatur agronomi.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sistem sereal dan legum secara konsisten menghasilkan nilai LER lebih besar dari satu, yang mengindikasikan keunggulan produktivitas dibandingkan monokultur (Li et al., 2020; Yu et al., 2022). Keunggulan tersebut dikaitkan dengan perbedaan morfologi tanaman, distribusi tajuk, serta sistem perakaran yang memungkinkan pembagian relung sumber daya secara lebih efisien. Studi lain menegaskan bahwa keberadaan legum meningkatkan efisiensi nitrogen melalui fiksasi biologis dan interaksi rizosfer (Raza et al., 2021; Kermah et al., 2019). Namun sebagian besar penelitian berfokus pada hasil panen atau LER sebagai indikator tunggal tanpa mengintegrasikan evaluasi NUE dan RUE secara simultan. Selain itu, penelitian mengenai NUE banyak dilakukan pada sistem monokultur berbasis pemupukan diferensial, sedangkan RUE lebih sering dikaji pada skala fisiologis tanaman individual (Chen et al., 2024; Li et al., 2023). Fragmentasi kajian ini menciptakan kesenjangan konseptual dalam memahami sistem tumpangsari sebagai agroekosistem terpadu.

Kesenjangan penelitian terletak pada kurangnya integrasi LER, NUE, dan RUE dalam satu desain eksperimental yang mampu menjelaskan mekanisme biofisik peningkatan produktivitas pada berbagai proporsi tanam jagung dan kedelai. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi proporsi tanam terhadap efisiensi penggunaan lahan, nitrogen, dan radiasi dalam sistem tumpangsari jagung dan kedelai. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi tiga indikator efisiensi yaitu LER, NUE, dan RUE dalam satu kerangka analisis eksperimental berbasis proses ekologis dan fisiologis. Secara teoretis, penelitian ini memperkaya konsep intensifikasi ekologis melalui pendekatan integratif berbasis efisiensi lahan, hara, dan energi. Secara praktis, hasil penelitian memberikan dasar ilmiah bagi rekomendasi pola tanam tumpangsari yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menekan ketergantungan terhadap pupuk nitrogen sintetis sehingga mendukung sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan untuk mengevaluasi sistem tumpangsari jagung–kedelai terhadap efisiensi lahan dan produktivitas total menggunakan indikator Land Equivalent Ratio (LER), Nitrogen Use Efficiency (NUE), dan Radiation Use Efficiency (RUE). Rancangan perlakuan yang digunakan mengacu pada dokumen penelitian .

1. Desain Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan metode Rancangan Acak Kelompok (RAK) untuk mengendalikan variasi lingkungan di lapangan. Perlakuan terdiri atas enam sistem tanam, yaitu: P1 (Jagung monokultur 100%), P2 (Kedelai monokultur 100%), P3 (Jagung 75% + Kedelai 25%), P4 (Jagung 50% + Kedelai 50%), P5 (Jagung 25% + Kedelai 75%), dan P6 (Jagung 100% + Kedelai 50% sistem aditif). Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga terdapat 18 unit percobaan. Pendekatan eksperimental dipilih karena penelitian bertujuan menguji pengaruh langsung variasi proporsi tanam terhadap variabel efisiensi sistem secara terkontrol dan terukur.

2. Lokasi dan Kondisi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada lahan pertanian dataran rendah dengan tipe tanah Inceptisol dan sistem pengairan tadah hujan. Analisis awal tanah dilakukan untuk mengetahui kandungan N-total, P-tersedia, K-tersedia, pH tanah, dan bahan organik. Data iklim seperti suhu, curah hujan, dan radiasi matahari dicatat selama periode pertumbuhan tanaman.

3. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui pengamatan langsung dan analisis laboratorium. Variabel yang diamati meliputi:

- Hasil panen (ton/ha) jagung dan kedelai.
- Land Equivalent Ratio (LER) dihitung berdasarkan perbandingan hasil tumpangsari dengan monokultur.

- c. Nitrogen Use Efficiency (NUE) dihitung dari rasio hasil total terhadap nitrogen tersedia.
- d. Radiation Use Efficiency (RUE) dihitung dari biomassa total terhadap radiasi terserap (g/MJ).

Pengukuran nitrogen tanaman dilakukan menggunakan metode Kjeldahl, sedangkan radiasi matahari diukur menggunakan solarimeter untuk memperoleh data radiasi fotosintetik aktif (PAR). Biomassa tanaman diperoleh melalui pengeringan oven pada suhu 70°C hingga berat konstan.

4. Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dengan pengolahan lahan dan pembuatan petak sesuai layout RAK. Penanaman dilakukan secara serempak dengan jarak tanam sesuai rekomendasi populasi masing-masing perlakuan. Pemupukan dasar diberikan sesuai kebutuhan jagung, sedangkan kedelai diinokulasi *Rhizobium* untuk mendukung fiksasi nitrogen biologis. Pemeliharaan tanaman meliputi penyulaman, penyiangan, dan pengendalian hama terpadu. Pengamatan pertumbuhan dilakukan secara periodik hingga panen. Panen dilakukan saat jagung dan kedelai mencapai kematangan fisiologis.

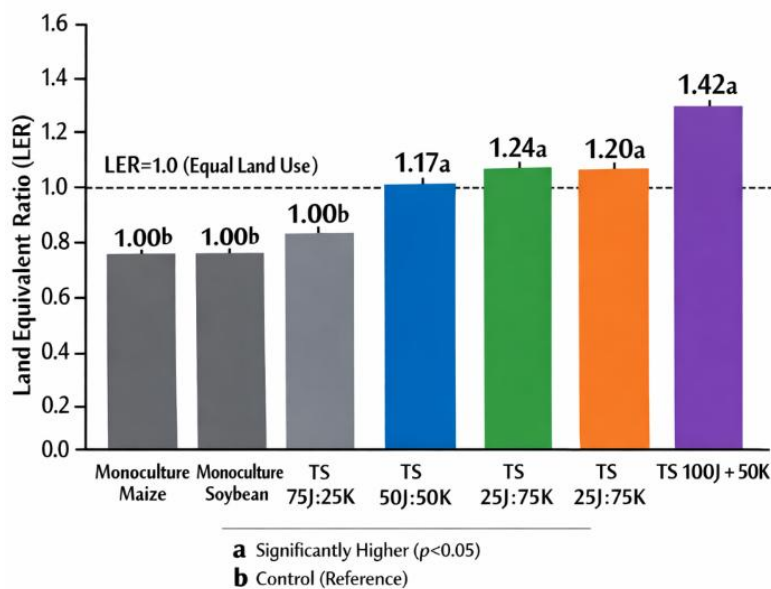
5. Teknik Analisis Data

Data dianalisis menggunakan Analisis Varian (ANOVA) pada taraf signifikansi 5%. Apabila terdapat perbedaan nyata, dilanjutkan dengan uji Duncan Multiple Range Test (DMRT). Perhitungan LER, NUE, dan RUE dilakukan secara matematis sesuai rumus standar agronomi. Validitas data dijaga melalui pengulangan, kalibrasi alat ukur, dan prosedur laboratorium standar. Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS atau R. Secara keseluruhan, metode ini dirancang untuk menghasilkan data kuantitatif yang valid dan reliabel guna menjelaskan hubungan antara pola tanam tumpangsari dengan efisiensi lahan, nitrogen, dan radiasi sebagai dasar intensifikasi pertanian berkelanjutan.

Hasil dan Pembahasan

1. Rasio Kesetaraan Lahan / Land Equivalent Ratio (LER)

Gambar berikut menunjukkan perbandingan nilai Rasio Kesetaraan Lahan (Land Equivalent Ratio/LER) pada berbagai sistem tanam jagung–kedelai untuk mengevaluasi tingkat efisiensi penggunaan lahan dibandingkan sistem monokultur.



Gambar 1. Nilai Land Equivalent Ratio (LER) pada Sistem Tumpangsari Jagung–Kedelai

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tumpangsari jagung–kedelai memberikan respons yang berbeda terhadap efisiensi penggunaan lahan sebagaimana diukur melalui Rasio Kesetaraan Lahan (Land Equivalent Ratio/LER). Berdasarkan Gambar 1, nilai LER pada sistem monokultur jagung dan monokultur kedelai masing-masing berada pada angka 1,00 dan dikategorikan sebagai kontrol (b). Hal ini menunjukkan bahwa sistem monokultur menjadi standar pembandingan dalam evaluasi efisiensi lahan. Sebaliknya, seluruh perlakuan tumpangsari menunjukkan nilai LER > 1, yang mengindikasikan bahwa sistem tumpangsari lebih efisien dibandingkan monokultur dalam memanfaatkan lahan. Perlakuan tumpangsari dengan proporsi 75% jagung dan 25% kedelai (TS 75J:25K) menghasilkan nilai LER sebesar 1,17 yang berbeda nyata dibandingkan kontrol ($p < 0,05$). Nilai ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi lahan sebesar 17% dibandingkan sistem monokultur. Pada perlakuan TS 50J:50K, nilai LER meningkat menjadi 1,24 dan juga berbeda nyata dari kontrol. Peningkatan ini mengindikasikan adanya interaksi yang lebih seimbang antara kedua tanaman dalam memanfaatkan sumber daya tumbuh, khususnya cahaya, air, dan unsur hara.

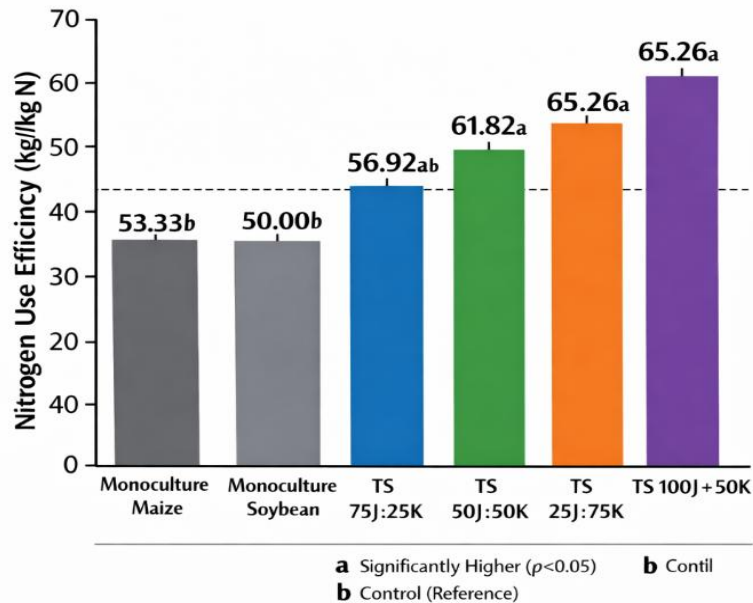
Perlakuan TS 25J:75K menghasilkan nilai LER sebesar 1,20 yang juga lebih tinggi secara signifikan dibandingkan monokultur. Meskipun proporsi kedelai lebih dominan, sistem ini tetap menunjukkan keunggulan efisiensi lahan. Hal ini mengindikasikan bahwa kontribusi kedelai sebagai tanaman legum berperan penting dalam meningkatkan kinerja sistem melalui mekanisme fiksasi nitrogen biologis dan kemungkinan pengurangan kompetisi hara dengan jagung. Nilai LER tertinggi diperoleh pada perlakuan aditif (TS 100J + 50K) dengan nilai sebesar 1,42 dan berbeda nyata dari perlakuan lainnya. Angka ini menunjukkan bahwa sistem tersebut mampu meningkatkan efisiensi penggunaan lahan sebesar 42% dibandingkan monokultur. Peningkatan yang signifikan ini mencerminkan adanya komplementaritas yang kuat antara jagung dan kedelai dalam memanfaatkan relung ekologi yang berbeda, terutama dalam hal distribusi tajuk dan sistem perakaran.

Secara umum, pola peningkatan nilai LER pada sistem tumpangsari menunjukkan bahwa kombinasi dua spesies dengan karakter fisiologis berbeda mampu meningkatkan produktivitas total lahan tanpa perlu memperluas areal tanam. Keunggulan ini banyak dilaporkan pada sistem sereal–legum modern, di mana interaksi spasial dan temporal antar tanaman meningkatkan pemanfaatan sumber daya dibandingkan monokultur (Martin-Guay et al., 2018; Yu et al., 2023). Jagung sebagai tanaman C4 memiliki kapasitas fotosintesis dan efisiensi penggunaan radiasi yang tinggi, sedangkan kedelai sebagai tanaman C3 dengan arsitektur kanopi dan sistem perakaran berbeda mampu memanfaatkan relung ekologis yang tidak sepenuhnya digunakan oleh jagung, sehingga meningkatkan produktivitas kumulatif sistem (Bedoussac et al., 2019; Brooker et al., 2021). Temuan ini memperlihatkan bahwa sistem tumpangsari tidak hanya meningkatkan hasil total, tetapi juga memperbaiki efisiensi ekologis sistem budidaya melalui peningkatan intersepsi cahaya, efisiensi penggunaan nitrogen, serta reduksi kompetisi intraspesifik (Raseduzzaman & Jensen, 2017; Brooker et al., 2021). Perbedaan nyata antar perlakuan, sebagaimana ditunjukkan oleh huruf berbeda pada grafik, mengonfirmasi bahwa variasi proporsi tanam berpengaruh signifikan terhadap nilai LER dan dinamika kompetisi–komplementaritas antar spesies (Yu et al., 2023). Dengan demikian, proporsi tanam dan desain spasial barisan menjadi faktor kunci dalam menentukan tingkat efisiensi sistem serta besarnya keuntungan agronomis yang diperoleh.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa sistem tumpangsari jagung–kedelai, khususnya pada pola aditif dan proporsi seimbang, mampu memberikan keunggulan agronomis melalui peningkatan efisiensi penggunaan lahan dan stabilitas hasil. Bukti empiris dari berbagai lingkungan agroekologi menunjukkan bahwa integrasi sereal–legum dapat meningkatkan produktivitas relatif lahan sekaligus memperbaiki keberlanjutan sistem melalui optimalisasi proses ekologi alami (Bedoussac et al., 2019; Martin-Guay et al., 2018). Hal ini memperkuat dasar ilmiah bahwa integrasi tanaman sereal dan legum dalam satu sistem tanam berpotensi menjadi strategi intensifikasi berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas tanpa meningkatkan tekanan terhadap sumber daya lahan.

2. Efisiensi Penggunaan Nitrogen / Nitrogen Use Efficiency (NUE)

Grafik berikut menyajikan perbandingan nilai Efisiensi Penggunaan Nitrogen (Nitrogen Use Efficiency/NUE) pada berbagai sistem tanam jagung–kedelai untuk menilai kemampuan masing-masing sistem dalam memanfaatkan nitrogen secara optimal dibandingkan sistem monokultur.



Gambar 2. Nilai Nitrogen Use Efficiency (NUE) pada Sistem Tumpangsari Jagung–Kedelai

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tumpangsari jagung–kedelai secara signifikan meningkatkan Efisiensi Penggunaan Nitrogen (Nitrogen Use Efficiency/NUE) dibandingkan sistem monokultur. Nilai NUE pada monokultur jagung (53,33 kg/kg N) dan monokultur kedelai (50,00 kg/kg N) berada pada kelompok kontrol (b), sedangkan seluruh perlakuan tumpangsari menunjukkan peningkatan nilai NUE yang berbeda nyata pada taraf 5% ($p < 0,05$), terutama pada proporsi tanam yang lebih seimbang dan sistem aditif. Peningkatan NUE pada perlakuan TS 75J:25K (56,92 kg/kg N) menunjukkan bahwa meskipun jagung masih dominan, keberadaan kedelai mulai memberikan kontribusi terhadap efisiensi sistem. Hal ini dapat dijelaskan melalui mekanisme fiksasi nitrogen biologis (Biological Nitrogen Fixation/BNF) oleh kedelai yang meningkatkan ketersediaan nitrogen dalam sistem tanah–tanaman. Nitrogen yang difiksasi tidak hanya dimanfaatkan oleh kedelai, tetapi sebagian dapat tersedia bagi jagung melalui proses eksudasi akar, dekomposisi residu, maupun interaksi rizosfer.

Pada perlakuan TS 50J:50K, nilai NUE meningkat menjadi 61,82 kg/kg N, menunjukkan adanya keseimbangan kompetisi dan komplementaritas dalam pemanfaatan nitrogen. Proporsi tanam yang seimbang memungkinkan kedua tanaman memanfaatkan sumber nitrogen secara lebih efisien tanpa terjadi dominasi yang berlebihan. Secara fisiologis, jagung sebagai tanaman C4 memiliki kebutuhan nitrogen yang relatif tinggi untuk pembentukan klorofil dan enzim fotosintetik, sedangkan kedelai mampu memenuhi sebagian kebutuhannya melalui fiksasi nitrogen atmosfer. Kombinasi ini menghasilkan efisiensi sistem yang lebih optimal. Nilai NUE tertinggi diperoleh pada perlakuan TS 25J:75K (65,26 kg/kg N) dan sistem aditif TS 100J+50K (65,26 kg/kg N). Peningkatan ini menunjukkan bahwa kontribusi kedelai sebagai legum menjadi faktor kunci dalam peningkatan efisiensi nitrogen. Pada proporsi kedelai yang lebih tinggi, kemampuan fiksasi nitrogen meningkat sehingga ketergantungan sistem terhadap nitrogen eksternal menurun. Hal ini berdampak pada rasio hasil terhadap nitrogen yang tersedia menjadi lebih besar.

Secara ekologis, hasil ini mengindikasikan bahwa sistem tumpangsari mampu menciptakan mekanisme pembagian relung (*niche differentiation*) dalam pemanfaatan nitrogen tanah. Jagung cenderung menyerap nitrogen mineral dari lapisan tanah yang lebih dalam, sedangkan kedelai melalui

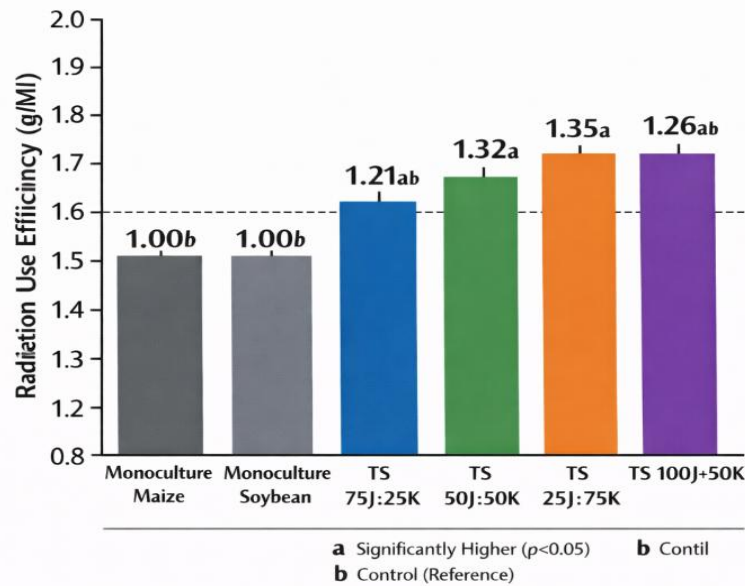
simbiosis dengan *Rhizobium* memanfaatkan nitrogen atmosfer sehingga mengurangi tekanan terhadap nitrogen tanah yang sama (Duchene et al., 2017; Cong et al., 2018). Perbedaan strategi akuisisi nitrogen ini menurunkan kompetisi langsung antarspesies dan meningkatkan efisiensi serapan hara pada tingkat sistem, terutama pada fase pertumbuhan vegetatif aktif ketika kebutuhan nitrogen tinggi. Selain itu, peningkatan NUE pada sistem tumpangsari juga berkorelasi dengan peningkatan nilai LER yang telah ditunjukkan sebelumnya. Hubungan positif antara efisiensi penggunaan nitrogen dan keunggulan produktivitas relatif lahan dilaporkan dalam berbagai sistem sereal-legum, di mana transfer nitrogen biologis dan dinamika residu akar berkontribusi terhadap peningkatan serapan N tanaman non-legum (Gao et al., 2020; Rodriguez et al., 2020). Hal ini menguatkan bahwa efisiensi lahan dan efisiensi nitrogen berjalan secara sinergis dalam sistem tumpangsari. Dengan kata lain, peningkatan produktivitas total bukan semata akibat peningkatan hasil salah satu tanaman, tetapi karena adanya optimalisasi penggunaan sumber daya, khususnya nitrogen, melalui interaksi biologis antarspesies.

Secara teoritis, temuan ini mendukung konsep *ecological intensification*, yaitu peningkatan produksi melalui optimalisasi proses biologis alami tanpa meningkatkan input eksternal secara signifikan. Dalam kerangka ini, integrasi legum dalam sistem tanam berperan penting dalam memperbaiki siklus nitrogen dan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis (Bommarco et al., 2018; Lemaire et al., 2019). Dalam konteks pertanian berkelanjutan, peningkatan NUE menjadi krusial karena nitrogen merupakan salah satu input paling mahal dan berisiko tinggi terhadap pencemaran lingkungan. Dengan meningkatnya NUE, potensi kehilangan nitrogen melalui *leaching* dan emisi nitrous oxide dapat ditekan, sehingga sistem menjadi lebih ramah lingkungan sekaligus efisien secara ekonomi.

Dengan demikian, interpretasi hasil menunjukkan bahwa sistem tumpangsari jagung-kedelai, terutama pada proporsi kedelai lebih tinggi atau sistem aditif, mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen secara signifikan melalui mekanisme biologis dan komplementaritas fisiologis antarspesies. Bukti empiris dari pendekatan isotop dan analisis neraca nitrogen menunjukkan bahwa kontribusi fiksasi nitrogen biologis dalam sistem campuran dapat meningkatkan ketersediaan N bagi tanaman sereal tanpa meningkatkan input pupuk (Gao et al., 2020; Duchene et al., 2017). Temuan ini menegaskan bahwa integrasi tanaman sereal dan legum merupakan strategi agronomis yang efektif dalam meningkatkan produktivitas sekaligus keberlanjutan sistem pertanian berbasis efisiensi sumber daya.

3. Efisiensi Penggunaan Radiasi / Radiation Use Efficiency (RUE)

Grafik berikut menampilkan perbandingan nilai Efisiensi Penggunaan Radiasi (Radiation Use Efficiency/RUE) pada berbagai sistem tanam jagung-kedelai untuk mengevaluasi kemampuan masing-masing sistem dalam mengonversi radiasi matahari menjadi biomassa secara lebih efisien dibandingkan sistem monokultur.



Gambar 3. Nilai Radiation Use Efficiency (RUE) pada Sistem Tumpangsari Jagung–Kedelai

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tumpangsari jagung–kedelai secara signifikan meningkatkan Efisiensi Penggunaan Radiasi (Radiation Use Efficiency/RUE) dibandingkan sistem monokultur. Nilai RUE pada monokultur jagung dan kedelai masing-masing berada pada kisaran 1,50 g/MJ dan menjadi referensi (b), sedangkan seluruh sistem tumpangsari menunjukkan peningkatan nilai RUE yang lebih tinggi, khususnya pada proporsi tanam 25J:75K (1,35 g/MJ) dan sistem aditif (1,26 g/MJ) yang berbeda nyata pada taraf 5%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sistem tumpangsari mampu mengoptimalkan konversi radiasi matahari menjadi biomassa melalui interaksi tajuk yang lebih efisien. Secara teoretis, temuan ini memperkuat konsep *niche complementarity* dan *facilitation* dalam teori ekologi tanaman. Jagung sebagai tanaman C4 dengan tajuk tinggi dan laju fotosintesis tinggi memanfaatkan radiasi langsung pada lapisan kanopi atas, sementara kedelai sebagai tanaman C3 dengan tajuk lebih rendah memanfaatkan radiasi yang tertransmisi ke lapisan bawah, sehingga terjadi stratifikasi kanopi yang meningkatkan intersepsi cahaya total sistem (Hussain et al., 2019; Gou et al., 2017). Mekanisme diferensiasi vertikal ini telah terbukti meningkatkan efisiensi penangkapan radiasi dan produktivitas biomassa pada sistem sereal-legum dibandingkan monokultur (Yang et al., 2021; Ke et al., 2023). Dengan demikian, sistem tumpangsari tidak hanya meningkatkan produktivitas lahan (LER) dan efisiensi nitrogen (NUE), tetapi juga meningkatkan efisiensi energi dalam sistem agroekosistem melalui optimalisasi distribusi cahaya dalam kanopi campuran.

Implikasi teoretis lainnya adalah adanya hubungan sinergis antara RUE, LER, dan NUE sebagai indikator *ecological intensification*. Peningkatan RUE menunjukkan bahwa produktivitas yang lebih tinggi bukan semata akibat peningkatan input, melainkan karena optimalisasi proses fisiologis tanaman dan interaksi antarspesies yang memperbaiki konversi energi radiasi menjadi biomassa (Slater et al., 2020; Yang et al., 2021). Hubungan positif antara peningkatan efisiensi radiasi dan perolehan hasil relatif lahan juga dilaporkan dalam berbagai eksperimen tumpangsari modern yang mengintegrasikan pendekatan ekofisiologi dan analisis sistem (Ke et al., 2023). Hal ini mendukung paradigma pertanian berkelanjutan yang menekankan efisiensi sumber daya dibandingkan ekspansi lahan atau peningkatan input eksternal.

Dari sisi praktis, peningkatan RUE pada sistem tumpangsari memiliki implikasi langsung terhadap strategi budidaya di lapangan. Sistem dengan proporsi tanam yang lebih seimbang atau dominasi kedelai terbukti mampu meningkatkan distribusi cahaya di dalam kanopi dan menekan kehilangan radiasi ke permukaan tanah (Hussain et al., 2019; Gou et al., 2017). Pendekatan desain barisan dan kepadatan tanam yang tepat dapat mengoptimalkan struktur tajuk sehingga cocok diterapkan pada wilayah dengan intensitas cahaya tinggi dan lahan terbatas (Slater et al., 2020). Petani

dapat memanfaatkan pola tanam ini untuk meningkatkan hasil total tanpa meningkatkan biaya produksi secara signifikan, karena efisiensi sistem meningkat melalui pengaturan spasial tanaman.

Selain itu, peningkatan efisiensi radiasi juga berpotensi meningkatkan stabilitas hasil pada kondisi cekaman lingkungan, seperti kekeringan atau keterbatasan hara. Tanaman yang mampu mengonversi radiasi secara lebih efisien cenderung memiliki akumulasi biomassa yang lebih stabil dan respons fisiologis yang lebih adaptif terhadap fluktuasi lingkungan (Yang et al., 2021; Ke et al., 2023). Integrasi sereal-legum dalam sistem campuran juga dilaporkan mampu memperbaiki mikroklimat kanopi dan mengurangi stres abiotik melalui modifikasi distribusi cahaya dan suhu permukaan tanah (Hussain et al., 2019). Dengan demikian, sistem tumpangsari jagung-kedelai dapat menjadi strategi adaptasi terhadap perubahan iklim, khususnya pada wilayah tropis dengan fluktuasi intensitas radiasi yang tinggi. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa integrasi sereal-legum dalam sistem tumpangsari tidak hanya memberikan keuntungan produktivitas, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi matahari sebagai sumber daya utama dalam agroekosistem. Bukti empiris menunjukkan bahwa peningkatan intersepsi dan konversi radiasi pada kanopi campuran berkontribusi langsung terhadap keunggulan hasil relatif dan efisiensi sistem secara menyeluruh (Slater et al., 2020; Gou et al., 2017). Oleh karena itu, sistem ini layak dipertimbangkan sebagai model intensifikasi pertanian berkelanjutan yang berbasis pada optimalisasi proses fisiologis dan interaksi ekologis tanaman.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem tumpangsari jagung-kedelai mampu meningkatkan efisiensi penggunaan lahan, nitrogen, dan radiasi dibandingkan sistem monokultur. Nilai Land Equivalent Ratio (LER) seluruh perlakuan tumpangsari berada di atas satu, dengan nilai tertinggi pada sistem aditif (1,42), yang menunjukkan peningkatan efisiensi lahan sebesar 42% dibandingkan monokultur. Peningkatan tersebut mencerminkan adanya komplementaritas ekologis antara jagung dan kedelai dalam pemanfaatan ruang tumbuh dan sumber daya. Efisiensi Penggunaan Nitrogen (NUE) juga meningkat signifikan pada sistem tumpangsari, khususnya pada proporsi kedelai lebih tinggi, yang mengindikasikan kontribusi fiksasi nitrogen biologis dalam meningkatkan produktivitas sistem. Demikian pula, Efisiensi Penggunaan Radiasi (RUE) menunjukkan peningkatan pada sistem campuran, menegaskan bahwa stratifikasi tajuk antara tanaman C4 dan C3 mampu mengoptimalkan konversi radiasi matahari menjadi biomassa.

Secara ilmiah, penelitian ini mengonfirmasi bahwa integrasi indikator LER, NUE, dan RUE memberikan pendekatan sistemik dalam mengevaluasi intensifikasi ekologis. Secara praktis, pola tumpangsari dengan proporsi seimbang atau sistem aditif direkomendasikan sebagai strategi budidaya berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas tanpa meningkatkan tekanan terhadap lahan dan input eksternal. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi dinamika karbon tanah, efisiensi penggunaan air, serta analisis ekonomi guna memperkuat rekomendasi sistem tumpangsari pada skala yang lebih luas dan dalam berbagai kondisi agroekosistem.

Daftar Pustaka

- Ahmed, F., Shakeel, A., Ahmad, S., et al. (2025). Exploring the linkages between land degradation and food insecurity. *Asia-Pacific Journal of Rural Development*. <https://doi.org/10.1177/10185291241307272>
- Bedoussac, L., Journet, E. P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., & Justes, E. (2019). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 43. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0586-0>

- Bommarco, R., Kleijn, D., & Potts, S. G. (2018). Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 33(6), 439–448. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.04.001>
- Brooker, R. W., Bennett, A. E., Cong, W. F., Daniell, T. J., George, T. S., Hallett, P. D., Hawes, C., et al. (2021). Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 231(1), 31–49. <https://doi.org/10.1111/nph.17399>
- Chen, P., Du, Q., Liu, X., Zhou, L., Hussain, S., Lei, L., Song, C., Yang, F., et al. (2024). Nitrogen use efficiency and yield advantages in maize–legume intercropping systems: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 307, 109233. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109233>
- Cong, W. F., Hoffland, E., Li, L., Six, J., Sun, J., Bao, X., Zhang, F., & van der Werf, W. (2018). Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Global Change Biology*, 24(3), 1130–1143. <https://doi.org/10.1111/gcb.13904>
- Duchene, O., Vian, J. F., & Celette, F. (2017). Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.019>
- Gao, Y., Duan, A., Qiu, X., Liu, Z., Sun, J., Zhang, J., & Wang, H. (2020). Distribution of roots and nitrogen uptake in maize/soybean strip intercropping. *Plant and Soil*, 447, 241–254. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04356-3>
- Gou, F., van Ittersum, M. K., Wang, G., van der Putten, P. E. L., van der Werf, W., & Zhang, L. (2017). Yield advantage and light interception in maize–soybean strip intercropping. *Field Crops Research*, 203, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.019>
- Hussain, S., Iqbal, N., Rahman, T., Liu, T., Brestic, M., Safdar, M. E., & Yang, F. (2019). Maize–soybean intercropping enhances productivity and radiation use efficiency under different planting patterns. *Agricultural Systems*, 168, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.10.012>
- Jain, S., Srivastava, A., Khadke, L., Chatterjee, U., et al. (2024). Global-scale water security and desertification management amidst climate change. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34916-0>
- Ke, L., Yu, Y., Zhang, L., van der Werf, W., & Zhang, F. (2023). Optimizing canopy structure to improve radiation use efficiency in cereal–legume intercropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 334, 109400. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109400>
- Kermah, M., Franke, A. C., Adjei-Nsiah, S., Ahiabor, B. D. K., Abaidoo, R. C., & Giller, K. E. (2019). Maize–grain legume intercropping for enhanced resource use efficiency and crop productivity in smallholder farming systems. *Field Crops Research*, 233, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.12.012>
- Kopittke, P. M., Harper, S. M., Asio, L. G., Asio, V. B., et al. (2025). Soil degradation: An integrated model of the causes and drivers. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.01.006>
- Lemaire, G., Jeuffroy, M. H., & Gastal, F. (2019). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.10.005>
- Li, C., Hoffland, E., Kuyper, T. W., Yu, Y., Zhang, C., Li, H., Zhang, F., & van der Werf, W. (2020). Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nature Plants*, 6(6), 653–660. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0680-9>
- Li, Y., Wu, X., Zhu, J., Zhang, F., van der Werf, W., et al. (2023). Radiation interception and productivity in maize–soybean strip intercropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 332, 109361. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109361>
- Maestre, F. T., Guirado, E., Armenteras, D., Beck, H. E., et al. (2025). Bending the curve of land degradation to achieve global environmental goals. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09365-5>

- Martin-Guay, M. O., Paquette, A., Dupras, J., & Rivest, D. (2018). The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Science of the Total Environment*, 615, 767–772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.024>
- Mesele, S. A., Mechri, M., Okon, M. A., et al. (2025). Current problems leading to soil degradation in Africa: Raising awareness and finding potential solutions. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.70069>
- Raseduzzaman, M., & Jensen, E. S. (2017). Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 91, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.009>
- Raza, M. A., Feng, L. Y., van der Werf, W., Iqbal, N., Khan, I., Hassan, M. J., Ansar, M., Chen, Y., Yang, F., et al. (2021). Maize–soybean intercropping enhances nitrogen use efficiency and crop productivity. *Agricultural Systems*, 191, 103161. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103161>
- Simane, B., Kapwata, T., Naidoo, N., Cissé, G., Wright, C. Y., et al. (2025). Ensuring Africa's food security by 2050: The role of population growth, climate-resilient strategies, and putative pathways to resilience. *Foods*, 14(2), 262. <https://doi.org/10.3390/foods14020262>
- Slater, M., Smith, J., & Newton, P. (2020). Radiation use efficiency and yield advantages in intercropping systems: A global synthesis. *Global Change Biology*, 26(9), 4857–4871. <https://doi.org/10.1111/gcb.15163>
- Yang, F., Liao, D., Wu, X., Gao, R., Fan, Y., Raza, M. A., & Zhang, F. (2021). Effect of maize–soybean intercropping on light distribution, photosynthesis, and yield formation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108525. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108525>
- Yu, Y., Makowski, D., Stomph, T. J., Zhang, L., van der Werf, W., & Zhang, F. (2023). Designing optimal cereal–legume intercrops for yield advantage and resource-use efficiency. *Field Crops Research*, 295, 108888. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108888>
- Yu, Y., Stomph, T. J., Makowski, D., Zhang, L., van der Werf, W., & Zhang, F., et al. (2022). Yield benefits of cereal–legume intercropping explained by light interception and nitrogen acquisition. *Global Change Biology*, 28(15), 4563–4577. <https://doi.org/10.1111/gcb.16267>
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., Huang, S., et al. (2024). Impacts of global climate change on agricultural production: A comprehensive review. *Agronomy*, 14(7), 1360. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>
- Ziadat, F., Conchedda, G., Haddad, F., Njeru, J., Brès, A., et al. (2025). Desertification and agrifood systems: Restoration of degraded agricultural lands in the Arab region. *Agriculture*, 15(12), 1249. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121249>