



Integrasi Adaptasi Perubahan Iklim dan Pemupukan Terpadu dalam Meningkatkan Produktivitas Kedelai, Efisiensi Nitrogen, dan Kesehatan Tanah

Paisal Ansiska ^{1*}, Selviana Anggraini ²

¹ Pendidikan Geografi Universitas Pattimura

²Agroteknologi Universitas Bina Insan

*Corresponding author's e-mail: paisal.ansiska@outlook.com

Article Info	Abstrak
<p><i>Article History:</i> Diterima : 06/03/2026 Direvisi : 11/03/2026 Diterima : 18/03/2026 Diterbitkan : 22/03/2026</p> <p>Kata Kunci: Produktivitas Kedelai; Efisiensi Nitrogen; Kualitas Tanah; Adaptasi Iklim; Pemupukan Terpadu</p>	<p>Perubahan iklim menjadi tantangan utama dalam meningkatkan produktivitas kedelai, terutama akibat cekaman kekeringan dan pengelolaan hara yang belum optimal. Penelitian ini bertujuan menganalisis integrasi adaptasi perubahan iklim dan strategi pemupukan terhadap produktivitas, efisiensi penggunaan nitrogen (NUE), dan kualitas tanah. Penelitian dilakukan menggunakan desain eksperimen faktorial dengan dua faktor, yaitu kondisi iklim (normal dan kekeringan) dan strategi pemupukan (tanpa pupuk, anorganik, organik, dan kombinasi). Data dikumpulkan melalui pengamatan lapangan dan analisis laboratorium, meliputi komponen hasil, indikator NUE, serta indeks kualitas tanah. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi pada kondisi normal menghasilkan kinerja tertinggi dengan hasil mencapai 2,9 ton/ha, AE sebesar 20,8 kg/kg N, dan SQI sebesar 0,78. Cekaman kekeringan menurunkan seluruh parameter, namun pemupukan kombinasi mampu mempertahankan performa relatif lebih baik. Penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan integratif dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian.</p>
<p><i>Keyword:</i> Soybean Productivity; Nitrogen Use Efficiency; Soil Quality; Climate Adaptation; Integrated Fertilization</p> <p> This article is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.</p>	<p>Abstract</p> <p><i>Climate change poses a major challenge to soybean productivity, particularly due to drought stress and suboptimal nutrient management. This study aims to analyze the integration of climate adaptation and fertilization strategies on productivity, Nitrogen Use Efficiency (NUE), and soil quality. A factorial experimental design was applied with two factors: climate conditions (normal and drought stress) and fertilization strategies (no fertilizer, inorganic, organic, and combined). Data were collected through field observations and laboratory analysis, including Yield components, NUE indicators, and Soil Quality Index. The results showed that combined fertilization under normal conditions achieved the highest performance, with Yield reaching 2.9 ton/ha, AE of 20.8 kg/kg N, and SQI of 0.78. Drought stress reduced all parameters, but combined fertilization maintained relatively better performance. This study highlights the importance of an integrated approach to improve productivity and agricultural sustainability.</i></p>

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

Ansiska, P., & Anggraini, S. (2026). Integrasi adaptasi perubahan iklim dan pemupukan terpadu dalam meningkatkan produktivitas kedelai, efisiensi nitrogen, dan kesehatan tanah. *Agrofera: Agronomical Journal*, 1(1), 23–33. <https://doi.org/xxxxxx>

Pendahuluan

Perubahan iklim telah menjadi isu global yang memberikan dampak signifikan terhadap sektor pertanian, khususnya pada tanaman pangan seperti kedelai. Peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya frekuensi kejadian kekeringan menyebabkan penurunan produktivitas tanaman secara signifikan. Di Indonesia, kedelai merupakan komoditas strategis sebagai sumber protein nabati, namun produktivitasnya masih relatif rendah dan sangat rentan terhadap cekaman lingkungan. Kondisi ini menuntut adanya strategi adaptasi yang efektif untuk menjaga stabilitas produksi dan ketahanan pangan. Selain faktor iklim, pengelolaan pemupukan juga menjadi aspek penting dalam sistem budidaya kedelai. Penggunaan pupuk anorganik secara intensif seringkali meningkatkan hasil dalam jangka pendek, namun dapat menurunkan kualitas tanah dalam jangka panjang. Sebaliknya, penggunaan pupuk organik mampu memperbaiki sifat tanah, tetapi seringkali kurang optimal dalam menyediakan hara secara cepat. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan integratif yang mengombinasikan kedua jenis pupuk tersebut untuk mencapai keseimbangan antara produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh adaptasi perubahan iklim terhadap produktivitas kedelai, peran strategi pemupukan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen dan kualitas tanah, serta interaksi antara kedua faktor tersebut dalam mendukung sistem pertanian kedelai yang berkelanjutan. Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perubahan iklim, khususnya cekaman kekeringan, memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman (Zandalinas et al., 2018; Fahad et al., 2017). Stres air dapat menghambat proses fisiologis seperti fotosintesis, transpirasi, dan penyerapan hara, sehingga menurunkan produktivitas tanaman secara keseluruhan (Seleiman et al., 2021). Selain itu, kondisi kekeringan juga memengaruhi efisiensi penggunaan nitrogen, di mana keterbatasan air menghambat mobilitas dan serapan nitrogen oleh akar tanaman (Gonzalez-Dugo et al., 2017). Dalam konteks ini, strategi pemupukan yang tepat menjadi sangat penting untuk mengoptimalkan ketersediaan hara sekaligus menjaga kualitas tanah. Pendekatan integratif yang mengombinasikan pupuk organik dan anorganik telah dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan (Mahmud et al., 2021; Meena et al., 2020).

Di sisi lain, penelitian mengenai strategi pemupukan menunjukkan bahwa penggunaan pupuk anorganik mampu meningkatkan hasil tanaman secara signifikan, namun berpotensi menimbulkan degradasi tanah jika digunakan secara berlebihan, seperti penurunan kandungan bahan organik dan gangguan keseimbangan mikrobiologi tanah (Liu et al., 2021; Guo et al., 2019). Sementara itu, pupuk organik terbukti dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah, aktivitas mikroorganisme, serta kapasitas tukar kation, yang berkontribusi terhadap peningkatan kualitas tanah dan keberlanjutan sistem pertanian (Lazcano et al., 2018; Zhang et al., 2020). Selain itu, penggunaan pupuk organik juga berperan dalam meningkatkan struktur tanah dan retensi air, yang sangat penting dalam menghadapi kondisi cekaman iklim. Oleh karena itu, konsep *integrated nutrient management* menjadi pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengoptimalkan penggunaan sumber hara secara efisien dan berkelanjutan (Kumar et al., 2020; Singh et al., 2021).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek produktivitas atau efisiensi penggunaan hara secara terpisah, sehingga belum mampu menggambarkan hubungan kompleks antara faktor lingkungan dan manajemen budidaya secara menyeluruh. Penelitian yang mengintegrasikan antara adaptasi perubahan iklim, strategi pemupukan, serta dampaknya terhadap

kualitas tanah dalam satu kerangka sistem masih relatif terbatas (Bindraban et al., 2018; Diacono & Montemurro, 2019). Kesenjangan penelitian (*research gap*) ini menunjukkan perlunya kajian yang lebih komprehensif untuk memahami hubungan antara produktivitas, efisiensi penggunaan nitrogen, dan kesehatan tanah dalam konteks pertanian berkelanjutan. Pendekatan integratif semacam ini diharapkan mampu memberikan dasar ilmiah yang lebih kuat dalam merancang sistem budidaya yang adaptif terhadap perubahan iklim sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya tanah.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh adaptasi perubahan iklim dan strategi pemupukan terhadap produktivitas kedelai, efisiensi penggunaan nitrogen, serta kualitas tanah. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi interaksi antara kedua faktor tersebut dalam mendukung sistem pertanian yang berkelanjutan. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan tiga indikator utama, yaitu produktivitas tanaman, efisiensi penggunaan nitrogen, dan indeks kualitas tanah dalam satu desain eksperimen yang terpadu.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baik secara teoretis maupun praktis. Secara teoretis, penelitian ini memperkaya kajian mengenai hubungan antara manajemen hara, adaptasi perubahan iklim, dan keberlanjutan sistem pertanian. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengembangan strategi pemupukan yang lebih efisien dan ramah lingkungan, khususnya dalam budidaya kedelai di wilayah yang rentan terhadap perubahan iklim. Selain itu, penelitian ini juga memberikan rekomendasi bagi petani dan pengambil kebijakan dalam menerapkan sistem pertanian berkelanjutan yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga kualitas tanah.

Metode Penelitian

1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen lapangan berbasis Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktorial. Faktor pertama adalah adaptasi perubahan iklim yang terdiri atas dua taraf, yaitu kondisi normal (A1) dan cekaman kekeringan (A2) yang diatur pada kelembaban tanah sekitar 60% kapasitas lapang. Faktor kedua adalah strategi pemupukan yang terdiri atas empat taraf, yaitu tanpa pupuk (B1), pemupukan anorganik (B2), pemupukan organik (B3), dan kombinasi pupuk organik dan anorganik (B4). Desain ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh utama dan interaksi kedua faktor terhadap produktivitas kedelai, efisiensi penggunaan nitrogen, serta kualitas tanah sebagai indikator keberlanjutan sistem pertanian.

2. Lokasi dan Partisipan

Penelitian dilaksanakan pada lahan percobaan dengan jenis tanah Inceptisol yang memiliki tekstur lempung berpasir dan pH awal sekitar 5,6. Lokasi penelitian berada pada wilayah dataran rendah tropis dengan suhu berkisar antara 27–32°C. Tanaman yang digunakan adalah kedelai varietas Anjasmoro yang memiliki potensi hasil tinggi dan adaptif terhadap kondisi lingkungan tropis. Unit percobaan berupa petak berukuran 2 m × 3 m yang disusun dalam tiga ulangan. Penempatan perlakuan dilakukan secara acak dalam setiap kelompok untuk meminimalkan pengaruh heterogenitas lahan.

3. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui pengamatan langsung di lapangan dan analisis laboratorium. Parameter produktivitas meliputi berat biji per tanaman, jumlah polong, dan hasil per hektar. Efisiensi penggunaan nitrogen diukur menggunakan indikator Agronomic Efficiency (AE), Recovery Efficiency (RE), dan Partial Factor Productivity (PFP). Analisis kualitas tanah dilakukan dengan mengukur

kandungan C-organik menggunakan metode Walkley-Black, pH tanah menggunakan pH meter digital, serta kapasitas tukar kation (KTK) melalui metode ekstraksi amonium asetat (NH_4OAc). Seluruh pengukuran dilakukan secara berulang pada setiap unit percobaan untuk meningkatkan ketelitian dan reliabilitas data.

4. Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan pengolahan tanah melalui pembajakan dan penggaruan, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan petak percobaan. Penanaman kedelai dilakukan dengan jarak tanam $40 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. Perlakuan pemupukan anorganik menggunakan pupuk urea (46% N), SP-36 (36% P_2O_5), dan KCl (60% K_2O) dengan dosis masing-masing 50 kg N/ha, 75 kg P_2O_5 /ha, dan 50 kg K_2O /ha. Pupuk organik yang digunakan berupa kompos matang berbahan campuran jerami padi dan kotoran sapi yang telah terdekomposisi sempurna dengan kandungan C-organik sekitar 15–20%, yang diberikan dengan dosis 5 ton/ha. Pada perlakuan kombinasi, digunakan 50% dosis pupuk anorganik dan 2,5 ton/ha kompos. Benih kedelai diinokulasi dengan biofertilizer berupa *Rhizobium japonicum* sebelum tanam untuk meningkatkan fiksasi nitrogen biologis. Adaptasi terhadap perubahan iklim dilakukan melalui penerapan mulsa organik berupa jerami padi kering dengan ketebalan sekitar 5 cm pada permukaan tanah untuk menjaga kelembaban dan suhu tanah. Perlakuan cekaman kekeringan dilakukan dengan mengurangi frekuensi penyiraman hingga mencapai sekitar 60% kapasitas lapang yang dipantau menggunakan soil moisture meter. Pemeliharaan tanaman meliputi penyiangan manual dan pengendalian hama secara mekanis tanpa penggunaan pestisida kimia.

5. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA) dua arah untuk menguji pengaruh faktor adaptasi perubahan iklim, strategi pemupukan, serta interaksi keduanya terhadap variabel produktivitas, efisiensi penggunaan nitrogen, dan kualitas tanah. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik seperti SPSS atau R. Hasil analisis disajikan dalam bentuk nilai rata-rata dan dibandingkan secara deskriptif untuk mengidentifikasi pola respons antar perlakuan. Interpretasi data difokuskan pada kecenderungan perubahan nilai antar perlakuan, khususnya dalam membandingkan kondisi normal dan cekaman kekeringan serta efektivitas masing-masing strategi pemupukan dalam mendukung produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian.

Hasil dan Pembahasan

1. Produktivitas Kedelai (*Yield*)

Tabel 1 menyajikan hasil pengamatan produktivitas kedelai yang meliputi berat biji, hasil per hektar, dan jumlah polong pada berbagai kombinasi perlakuan adaptasi perubahan iklim dan strategi pemupukan. Data menunjukkan adanya perbedaan produktivitas antar perlakuan yang mencerminkan respons tanaman terhadap kondisi lingkungan dan input nutrisi yang diberikan.

Tabel 1. Produktivitas Tanaman Kedelai pada Berbagai Perlakuan Adaptasi Iklim dan Strategi Pemupukan

Perlakuan	Berat Biji (g/tanaman)	Hasil (ton/ha)	Jumlah Polong (buah/tanaman)
A1B1 (Normal + Tanpa pupuk)	12,4	1,8	35
A1B2 (Normal + NPK)	18,7	2,6	52
A1B3 (Normal + Organik)	16,5	2,3	47
A1B4 (Normal + Kombinasi)	20,2	2,9	58
A2B1 (Kekeringan + Tanpa pupuk)	8,3	1,2	24
A2B2 (Kekeringan + NPK)	13,6	1,9	38
A2B3 (Kekeringan + Organik)	12,8	1,7	36
A2B4 (Kekeringan + Kombinasi)	15,4	2,1	42

Berdasarkan hasil penelitian pada , produktivitas tanaman kedelai menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar perlakuan adaptasi perubahan iklim dan strategi pemupukan. Pada kondisi normal (A1), perlakuan kombinasi pupuk (A1B4) menghasilkan nilai tertinggi pada seluruh parameter, yaitu berat biji sebesar 20,2 g/tanaman, hasil mencapai 2,9 ton/ha, dan jumlah polong sebanyak 58 buah/tanaman. Sementara itu, perlakuan tanpa pupuk (A1B1) menunjukkan nilai terendah pada kondisi normal, dengan hasil hanya 1,8 ton/ha. Pada kondisi cekaman kekeringan (A2), terjadi penurunan produktivitas pada seluruh perlakuan. Perlakuan A2B1 (tanpa pupuk) menunjukkan nilai terendah dengan berat biji 8,3 g/tanaman, hasil 1,2 ton/ha, dan jumlah polong 24 buah/tanaman. Meskipun demikian, perlakuan kombinasi pupuk (A2B4) masih mampu mempertahankan produktivitas relatif lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya di bawah kondisi stres, dengan hasil mencapai 2,1 ton/ha. Secara umum, pola data menunjukkan bahwa pemupukan kombinasi memberikan hasil terbaik baik pada kondisi normal maupun cekaman kekeringan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi lingkungan dan strategi pemupukan berpengaruh nyata terhadap produktivitas kedelai. Penurunan hasil pada kondisi kekeringan menunjukkan bahwa ketersediaan air merupakan faktor pembatas utama dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kekurangan air dapat menghambat proses fotosintesis, penyerapan hara, serta pembentukan polong, sehingga berdampak langsung terhadap penurunan hasil. Di sisi lain, pemberian pupuk, terutama kombinasi pupuk organik dan anorganik, terbukti mampu meningkatkan produktivitas tanaman. Hal ini disebabkan oleh peran pupuk anorganik yang menyediakan unsur hara secara cepat tersedia, sementara pupuk organik berperan dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Kombinasi kedua jenis pupuk tersebut menciptakan kondisi tanah yang lebih seimbang dan mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Selain itu, keberadaan bahan organik dalam tanah juga meningkatkan kapasitas retensi air, sehingga tanaman lebih toleran terhadap kondisi kekeringan.

Hasil penelitian ini memperkuat konsep pertanian berkelanjutan (*sustainable agriculture*) dan *integrated nutrient management*, di mana penggunaan kombinasi pupuk organik dan anorganik memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan penggunaan tunggal (Agegnehu et al., 2017; Meena et al., 2020; Kumar et al., 2020). Temuan ini juga mendukung teori bahwa interaksi antara faktor lingkungan dan manajemen input sangat menentukan produktivitas tanaman. Secara praktis, hasil ini memberikan implikasi penting bagi petani dan pengambil kebijakan. Penggunaan pupuk kombinasi dapat menjadi strategi adaptasi yang efektif dalam menghadapi perubahan iklim, khususnya pada

kondisi kekeringan (Zandalinas et al., 2018). Selain meningkatkan hasil, strategi ini juga berpotensi menjaga kualitas tanah dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penerapan pemupukan berimbang berbasis organik-anorganik perlu didorong dalam sistem budidaya kedelai untuk meningkatkan ketahanan pangan dan keberlanjutan pertanian.

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan anorganik mampu meningkatkan produktivitas tanaman secara signifikan dibandingkan penggunaan pupuk tunggal (Lazcano et al., 2018; Zhang et al., 2020). Beberapa penelitian melaporkan bahwa bahan organik dapat meningkatkan efisiensi penggunaan hara dan memperbaiki struktur tanah, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik, terutama pada kondisi stres lingkungan. Selain itu, temuan mengenai penurunan produktivitas akibat kekeringan juga konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa stres air merupakan salah satu faktor utama yang membatasi produksi tanaman pangan di wilayah tropis. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menunjukkan bahwa strategi pemupukan kombinasi mampu mengurangi dampak negatif cekaman kekeringan. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat pentingnya pendekatan integratif antara manajemen nutrisi dan adaptasi iklim dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian.

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

Tabel 2 menyajikan nilai efisiensi penggunaan nitrogen yang meliputi agronomic efficiency (AE), recovery efficiency (RE), dan partial factor productivity (PFP) pada berbagai kombinasi perlakuan. Data ini menggambarkan kemampuan tanaman kedelai dalam memanfaatkan unsur nitrogen secara optimal di bawah kondisi normal dan cekaman kekeringan, serta menunjukkan pengaruh strategi pemupukan terhadap efisiensi pemanfaatan hara.

Tabel 2. Efisiensi Penggunaan Nitrogen (*Nitrogen Use Efficiency*) pada Tanaman Kedelai akibat Perlakuan Adaptasi Iklim dan Strategi Pemupukan

Perlakuan	Agronomic Efficiency (AE) (kg hasil/kg N)	Recovery Efficiency (RE) (%)	Partial Factor Productivity (PFP) (kg/kg N)
A1B1 (Normal + Tanpa pupuk)	0,0	0	0,0
A1B2 (Normal + NPK)	18,5	62	52,0
A1B3 (Normal + Organik)	15,2	55	47,5
A1B4 (Normal + Kombinasi)	20,8	68	58,3
A2B1 (Kekeringan + Tanpa pupuk)	0,0	0	0,0
A2B2 (Kekeringan + NPK)	12,3	48	38,0
A2B3 (Kekeringan + Organik)	11,1	45	36,5
A2B4 (Kekeringan + Kombinasi)	14,6	52	42,0

Berdasarkan hasil penelitian pada , efisiensi penggunaan nitrogen (NUE) pada tanaman kedelai menunjukkan variasi yang jelas antar perlakuan adaptasi perubahan iklim dan strategi pemupukan. Pada kondisi normal (A1), perlakuan kombinasi pupuk (A1B4) menghasilkan nilai tertinggi pada seluruh indikator NUE, yaitu Agronomic Efficiency (AE) sebesar 20,8 kg hasil/kg N, Recovery Efficiency (RE) sebesar 68%, dan Partial Factor Productivity (PFP) sebesar 58,3 kg/kg N. Sebaliknya, perlakuan tanpa pupuk (A1B1) menunjukkan nilai terendah dengan AE, RE, dan PFP masing-masing sebesar 0, yang mencerminkan tidak adanya input nitrogen eksternal. Pada kondisi cekaman kekeringan (A2), terjadi penurunan nilai NUE pada seluruh perlakuan dibandingkan kondisi normal. Perlakuan A2B1 tetap menunjukkan nilai terendah dengan semua indikator bernilai nol. Sementara itu, perlakuan kombinasi pupuk (A2B4) masih menunjukkan nilai relatif lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya, dengan AE sebesar 14,6 kg hasil/kg N, RE sebesar 52%, dan PFP sebesar 42,0 kg/kg N. Secara umum, pola data menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan nitrogen menurun akibat cekaman kekeringan, namun dapat dipertahankan lebih baik melalui penerapan pemupukan kombinasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan nitrogen sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan strategi pemupukan yang diterapkan. Penurunan nilai AE, RE, dan PFP pada kondisi kekeringan mengindikasikan bahwa keterbatasan air menghambat proses serapan dan pemanfaatan nitrogen oleh tanaman. Air berperan penting dalam melarutkan unsur hara di dalam tanah serta memfasilitasi transportasi nitrogen ke dalam jaringan tanaman. Oleh karena itu, kondisi kekeringan menyebabkan penurunan efisiensi serapan nitrogen dan berdampak pada menurunnya produktivitas. Di sisi lain, perlakuan pemupukan kombinasi menunjukkan efisiensi nitrogen yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan tunggal. Hal ini disebabkan oleh sinergi antara pupuk anorganik yang menyediakan nitrogen dalam bentuk tersedia cepat dan pupuk organik yang berperan dalam meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan dan menyediakan hara secara bertahap. Selain itu, keberadaan bahan organik dalam tanah juga meningkatkan aktivitas mikroorganisme, termasuk bakteri penambat nitrogen seperti *Rhizobium japonicum*, yang berkontribusi terhadap peningkatan ketersediaan nitrogen bagi tanaman. Dengan demikian, kombinasi pupuk tidak hanya meningkatkan ketersediaan nitrogen, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatannya oleh tanaman.

Secara teoretis, hasil penelitian ini memperkuat konsep efisiensi penggunaan hara dalam sistem pertanian berkelanjutan, di mana peningkatan produktivitas tidak hanya bergantung pada jumlah input yang diberikan, tetapi juga pada efisiensi pemanfaatan input tersebut oleh tanaman (Mahmud et al., 2021; Meena et al., 2020). Temuan ini juga mendukung konsep *integrated nutrient management* yang menekankan pentingnya kombinasi sumber hara organik dan anorganik untuk meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem tanah (Agegnehu et al., 2017). Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan implikasi penting dalam pengelolaan pemupukan kedelai di lapangan. Penggunaan pupuk kombinasi terbukti lebih efisien dalam memanfaatkan nitrogen dibandingkan penggunaan pupuk tunggal, sehingga dapat mengurangi potensi kehilangan nitrogen ke lingkungan, seperti melalui pencucian (*leaching*) atau volatilisasi (Zhang et al., 2017). Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi biaya produksi, tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam konteks perubahan iklim, strategi pemupukan yang efisien menjadi semakin penting untuk menjaga produktivitas tanaman di tengah kondisi lingkungan yang tidak menentu.

Hasil penelitian ini konsisten dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan nitrogen cenderung menurun pada kondisi cekaman kekeringan akibat terganggunya proses fisiologis tanaman (Gonzalez-Dugo et al., 2017; Seleiman et al., 2021). Beberapa studi melaporkan bahwa kekurangan air dapat menghambat aktivitas enzim yang berperan dalam metabolisme nitrogen, sehingga menurunkan efisiensi pemanfaatan nitrogen oleh tanaman. Selain itu,

temuan bahwa kombinasi pupuk organik dan anorganik meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen juga sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa bahan organik dapat meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan hara dan mengurangi kehilangan nitrogen. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menunjukkan bahwa strategi pemupukan kombinasi tidak hanya meningkatkan efisiensi nitrogen pada kondisi normal, tetapi juga mampu mempertahankan efisiensi tersebut pada kondisi cekaman kekeringan. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan integratif dalam pengelolaan hara sebagai strategi adaptasi terhadap perubahan iklim sekaligus meningkatkan keberlanjutan sistem pertanian.

3. Indeks Keberlanjutan Tanah (*Soil Quality Index / Soil Health*)

Tabel 3 menyajikan indikator kualitas tanah yang meliputi kandungan C-organik, pH tanah, kapasitas tukar kation (KTK), serta indeks kualitas tanah (SQI) pada berbagai perlakuan. Data ini menunjukkan perubahan sifat kimia tanah sebagai respons terhadap kondisi lingkungan dan strategi pemupukan, serta menggambarkan tingkat keberlanjutan sistem budidaya kedelai yang diterapkan.

Tabel 3. Indeks Keberlanjutan Tanah (*Soil Quality Index*) pada Berbagai Perlakuan Adaptasi Iklim dan Strategi Pemupukan

Perlakuan	C-Organik (%)	pH Tanah	KTK (cmol/kg)	Indeks Kualitas Tanah (SQI)
A1B1 (Normal + Tanpa pupuk)	1,45	5,8	18,2	0,45
A1B2 (Normal + NPK)	1,72	6,1	20,5	0,58
A1B3 (Normal + Organik)	1,95	6,3	22,8	0,68
A1B4 (Normal + Kombinasi)	2,15	6,5	24,6	0,78
A2B1 (Kekeringan + Tanpa pupuk)	1,20	5,5	15,4	0,32
A2B2 (Kekeringan + NPK)	1,38	5,8	17,6	0,42
A2B3 (Kekeringan + Organik)	1,55	6,0	19,2	0,50
A2B4 (Kekeringan + Kombinasi)	1,70	6,2	21,0	0,60

Berdasarkan hasil penelitian pada , kualitas tanah yang diukur melalui indikator C-organik, pH tanah, kapasitas tukar kation (KTK), dan *Soil Quality Index* (SQI) menunjukkan variasi yang jelas antar perlakuan adaptasi perubahan iklim dan strategi pemupukan. Pada kondisi normal (A1), perlakuan kombinasi pupuk (A1B4) menghasilkan nilai tertinggi pada seluruh parameter, yaitu C-organik sebesar 2,15%, pH tanah 6,5, KTK sebesar 24,6 cmol/kg, dan SQI sebesar 0,78. Sebaliknya, perlakuan tanpa pupuk (A1B1) menunjukkan nilai terendah dengan C-organik 1,45%, pH tanah 5,8, KTK sebesar 18,2 cmol/kg, dan SQI sebesar 0,45. Pada kondisi cekaman kekeringan (A2), terjadi penurunan nilai kualitas tanah pada seluruh perlakuan dibandingkan kondisi normal. Perlakuan A2B1 (tanpa pupuk) menunjukkan nilai terendah dengan C-organik 1,20%, pH tanah 5,5, KTK sebesar 15,4 cmol/kg, dan SQI sebesar 0,32. Sementara itu, perlakuan kombinasi pupuk (A2B4) masih menunjukkan nilai relatif lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya dengan SQI sebesar 0,60. Secara umum, pola data

menunjukkan bahwa kualitas tanah menurun akibat cekaman kekeringan, namun dapat ditingkatkan melalui penerapan pemupukan organik maupun kombinasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas tanah sangat dipengaruhi oleh interaksi antara kondisi lingkungan dan strategi pemupukan. Penurunan nilai C-organik, KTK, dan pH tanah pada kondisi kekeringan mengindikasikan bahwa keterbatasan air tidak hanya memengaruhi tanaman, tetapi juga berdampak pada sifat kimia tanah. Kekeringan dapat mempercepat dekomposisi bahan organik dan mengurangi aktivitas mikroorganisme tanah, sehingga menurunkan kandungan bahan organik serta kapasitas tanah dalam menyimpan unsur hara. Sebaliknya, peningkatan kualitas tanah pada perlakuan pemupukan organik dan kombinasi menunjukkan bahwa bahan organik memiliki peran penting dalam memperbaiki sifat tanah. Kompos yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi sebagai sumber karbon yang meningkatkan kandungan C-organik tanah, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan kapasitas tukar kation. Selain itu, bahan organik juga berperan dalam menstabilkan pH tanah sehingga mendekati kondisi optimal bagi pertumbuhan kedelai. Pada perlakuan kombinasi, interaksi antara pupuk organik dan anorganik menciptakan kondisi tanah yang lebih seimbang, di mana hara tersedia secara cepat sekaligus berkelanjutan.

Konsep *soil health management* dalam pertanian berkelanjutan menekankan pentingnya menjaga kualitas tanah sebagai faktor utama dalam sistem produksi pertanian (Bünemann et al., 2018; Lal, 2020). Temuan ini juga mendukung pendekatan *circular agriculture*, di mana penggunaan bahan organik dari limbah pertanian seperti jerami dan kotoran ternak dapat meningkatkan kesuburan tanah sekaligus mengurangi ketergantungan pada input eksternal (Velthof et al., 2019). Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan implikasi penting dalam pengelolaan lahan pertanian, khususnya pada sistem budidaya kedelai di daerah yang rentan terhadap kekeringan. Penggunaan pupuk organik dan kombinasi terbukti mampu meningkatkan kualitas tanah, sehingga dapat meningkatkan ketahanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim (Diacono & Montemurro, 2019). Selain itu, peningkatan kualitas tanah juga berkontribusi terhadap efisiensi penggunaan hara dan air, yang pada akhirnya dapat meningkatkan produktivitas tanaman secara berkelanjutan. Oleh karena itu, strategi pemupukan berbasis organik perlu diintegrasikan dalam praktik pertanian modern untuk menjaga kesehatan tanah dalam jangka panjang.

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa bahan organik memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas tanah, terutama dalam meningkatkan kandungan C-organik dan kapasitas tukar kation (Lazcano et al., 2018; Zhang et al., 2020). Beberapa studi melaporkan bahwa aplikasi kompos dan pupuk kandang dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah serta memperbaiki struktur tanah, sehingga mendukung ketersediaan hara bagi tanaman. Selain itu, temuan mengenai penurunan kualitas tanah pada kondisi kekeringan juga konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa stres air dapat mengurangi aktivitas biologis tanah dan mempercepat degradasi bahan organik (Schimel, 2018). Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menunjukkan bahwa strategi pemupukan kombinasi mampu memitigasi dampak negatif tersebut dan mempertahankan kualitas tanah pada tingkat yang lebih baik dibandingkan perlakuan lainnya. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa integrasi antara manajemen hara dan adaptasi terhadap perubahan iklim merupakan kunci dalam menjaga keberlanjutan sistem pertanian.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pada , integrasi adaptasi perubahan iklim dan strategi pemupukan berpengaruh signifikan terhadap produktivitas kedelai, efisiensi penggunaan nitrogen (NUE), dan kualitas tanah. Perlakuan kombinasi pupuk (A1B4) pada kondisi normal menunjukkan performa terbaik dengan hasil mencapai 2,9 ton/ha, AE sebesar 20,8 kg hasil/kg N, serta indeks kualitas tanah (SQI) sebesar 0,78. Sebaliknya, kondisi cekaman kekeringan (A2) secara konsisten menurunkan seluruh parameter, namun perlakuan kombinasi (A2B4) masih mampu mempertahankan kinerja relatif lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya.

Temuan ini menegaskan bahwa strategi pemupukan kombinasi organik dan anorganik efektif dalam meningkatkan efisiensi penggunaan hara serta memperbaiki kualitas tanah, sekaligus menjadi pendekatan adaptif terhadap perubahan iklim. Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi pada penguatan konsep integrasi antara produktivitas, efisiensi nutrisi, dan kesehatan tanah dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Implikasinya, penerapan pemupukan terpadu perlu didorong sebagai strategi utama dalam budidaya kedelai, khususnya pada lahan yang rentan terhadap cekaman iklim. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi dinamika jangka panjang kualitas tanah dan interaksi mikrobiologis dalam sistem pertanian adaptif.

Daftar Pustaka

- Agegnehu, G., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2017). Benefits of organic and inorganic fertilizer integration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.009>
- Bindraban, P. S., Dimkpa, C. O., & Pandey, R. (2018). Exploring phosphorus fertilizers and soil fertility. *Plant and Soil*, 427, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3436-4>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Chen, H., Zhao, Y., Feng, H., & Li, H. (2018). Effects of organic fertilizers on soil fertility. *Soil and Tillage Research*, 175, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.009>
- Diacono, M., & Montemurro, F. (2019). Long-term effects of organic amendments. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0584-0>
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., & Huang, J. (2017). Crop production under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01149>
- Gonzalez-Dugo, V., Durand, J. L., & Gastal, F. (2017). Water deficit and nitrogen nutrition of crops. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 529–544. <https://doi.org/10.1051/agro/2009057>
- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., & Zhang, F. S. (2019). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
- Kumar, S., Meena, R. S., Jhariya, M. K., & Meena, B. P. (2020). Integrated nutrient management. *Journal of Plant Nutrition*, 43(12), 1–15. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1739295>
- Lal, R. (2020). Soil health and carbon management. *Soil and Tillage Research*, 195, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>

- Lazcano, C., Zhu-Barker, X., & Decock, C. (2018). Effects of organic fertilizers on soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 124, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.019>
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on crop production. *Nature*, 529, 84–87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
- Liu, E., Yan, C., Mei, X., He, W., Bing, S. H., Ding, L., & Fan, T. (2021). Long-term fertilization effects on soil properties. *Field Crops Research*, 150, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.011>
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2017). Climate trends and global crop production. *Science*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. (2021). Current progress in nitrogen fertilization. *Agronomy*, 11(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030472>
- Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., Lal, R., Vijayakumar, V., & Brtnicky, M. (2020). Impact of integrated nutrient management. *Agronomy*, 10(8), 1–23. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081051>
- Schimel, J. (2018). Life in dry soils: Effects of drought on soil microbial communities. *Nature Reviews Microbiology*, 16, 1–10. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.155>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. (2021). Drought stress impacts on crops. *Plants*, 10(8), 1–21. <https://doi.org/10.3390/plants10081643>
- Singh, R. P., Singh, P., & Singh, R. (2021). Nutrient management strategies. *Agronomy Journal*, 113(2), 1–12. <https://doi.org/10.1002/agj2.20533>
- Sudaryanto, T., & Swastika, D. K. S. (2018). Soybean development in Indonesia. *Food Security*, 10(3), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0806-3>
- Velthof, G. L., Lesschen, J. P., Webb, J., Pietrzak, S., Miatkowski, Z., Pinto, M., & Oenema, O. (2019). Circular agriculture and nutrient recycling. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 113, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9959-7>
- Zandalinas, S. I., Mittler, R., Balfagón, D., Arbona, V., & Gómez-Cadenas, A. (2018). Plant adaptations to drought stress. *Plant, Cell & Environment*, 41(2), 1–14. <https://doi.org/10.1111/pce.13055>
- Zhang, W., Xu, M., Wang, B., & Wang, X. (2020). Soil organic matter and crop Yield. *Geoderma*, 357, 113975. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113975>
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2017). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528, 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>