



## Pendekatan Integrasi Rotasi Tumpangsari dan Amandemen Organik dalam Upaya Keberlanjutan Sistem Pertanian Lahan Kering

Agustina Ayu Wardani<sup>1\*</sup>, Lolita Endang Susilowati<sup>2</sup>, Mulyati<sup>3</sup>, Suwardji<sup>4</sup>

Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana, Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Gomong, Kota Mataram, NTB, Indonesia 83125.

Email Korespondensi: [agustinaayuwardani0108@gmail.com](mailto:agustinaayuwardani0108@gmail.com)

### Abstrak

Lahan kering memiliki keterbatasan air dan kesuburan tanah, sehingga membutuhkan strategi pengelolaan yang meningkatkan efisiensi sumber daya dan menjaga kesehatan ekosistem. Studi ini bertujuan mengkaji integrasi rotasi-tumpangsari dengan amandemen organik untuk meningkatkan efisiensi penggunaan hara dan air dalam mendukung pertanian lahan kering berkelanjutan. Metode yang digunakan adalah *systematic literature review* terhadap 20 artikel yang lolos seleksi akhir, terdiri atas 4 artikel dari MDPI, 2 dari SpringerLink, 3 dari Frontiers, dan 11 dari Google Scholar (jurnal internasional maupun nasional terindeks SINTA). Literatur yang direview berfokus pada analisis pola tanam rotasi-tumpangsari yang dikombinasikan dengan bahan organik seperti kompos dan pupuk kandang, serta evaluasi dampaknya terhadap kualitas tanah dan pengelolaan hara-air. Data dianalisis menggunakan pendekatan tematik dan sintesis naratif. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi rotasi-tumpangsari dan amandemen organik meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan kemampuan tanah menahan air dan menyediakan hara bagi tanaman. Pendekatan ini juga menekan erosi, mengurangi ketergantungan pada pestisida sintetik, memperpanjang masa produktif lahan, dan menurunkan risiko kegagalan panen akibat perubahan iklim ekstrem. Studi merekomendasikan model agroekologi yang mengintegrasikan diversifikasi tanaman dan amandemen organik sebagai strategi jangka panjang untuk meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan, dengan implikasi positif bagi ketahanan pangan dan kesejahteraan petani.

**Kata kunci:** Rotasi Tumpangsari; Amandemen Organik; Lahan Kering; Keberlanjutan Pertanian.

## An Integration Approach of Intercropping Rotation and Organic Amendments in Efforts to Sustain Dryland Farming Systems

### Abstract

Drylands are characterized by limited water availability and low soil fertility, requiring management strategies that improve resource use efficiency while sustaining ecosystem health. This study reviews the integration of crop rotation-intercropping with organic amendments to enhance nutrient and water use efficiency in support of sustainable dryland agriculture. A systematic literature review was conducted on 20 articles that passed the final screening, comprising 4 articles from MDPI, 2 from SpringerLink, 3 from Frontiers, and 11 from Google Scholar (including international journals and nationally indexed SINTA journals). The reviewed literature focused on rotation-intercropping configurations combined with organic inputs such as compost and manure, and evaluated their effects on soil quality and nutrient-water management. Data were examined through thematic analysis and narrative synthesis. The synthesis indicates that integrating rotation-intercropping with organic amendments increases soil organic matter, improves soil structure, and enhances the soil's capacity to retain water and supply nutrients to crops. This approach also reduces soil erosion, decreases reliance on synthetic pesticides, prolongs the productive lifespan of dryland fields, and lowers the risk of crop failure under extreme climate change and variability. The study recommends an agroecological model that integrates crop diversification with organic amendments as an effective long-term strategy to increase productivity while safeguarding dryland system sustainability, with positive implications for food security and smallholder farmer welfare.

**Keywords:** Intercropping Rotation; Organic Amendment; Dry Land; Agricultural Sustainability.

**How to Cite:** Wardani, . A. A., Susilowati, L. E., Mulyati, M., & Suwardji, S. (2025). Pendekatan Integrasi Rotasi Tumpangsari dan Amandemen Organik dalam Upaya Keberlanjutan Sistem Pertanian Lahan Kering. *Empiricism Journal*, 6(4), 2350-2365. <https://doi.org/10.36312/beywdj59>



<https://doi.org/10.36312/beywdj59>

Copyright© 2025, Wardani et al.

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



## PENDAHULUAN

Pasar pangan global saat ini menghadapi berbagai tantangan yang kompleks dan saling terkait, mulai dari gangguan rantai pasok akibat pandemi COVID-19 hingga

perubahan iklim ekstrem dan konflik geopolitik. Pandemi telah menyebabkan terputusnya distribusi pangan dan membatasi akses petani ke pasar, sehingga secara langsung mengganggu produksi dan konsumsi pangan secara global maupun nasional (Natasha et al., 2025). Perubahan iklim membawa dampak ekstrem berupa kekeringan, banjir, dan suhu tinggi yang mengganggu produktivitas pertanian serta mengancam ketersediaan air untuk irigasi. Konflik seperti perang Rusia-Ukraina memberikan dampak besar dengan menghambat pasokan gandum dan pupuk dunia, yang kemudian memicu lonjakan harga komoditas pangan dan menimbulkan ketidakstabilan pasaran. Konflik geopolitik dan instabilitas politik yang mengganggu rantai pasok pangan dunia, meningkatkan risiko ketidakstabilan harga dan pasokan (Mariyanto et al., 2025). Kondisi pasar yang tidak stabil ini mengakibatkan ketidakpastian dalam produksi dan harga pangan, yang pada akhirnya menjadi ancaman serius bagi ketahanan pangan baik di tingkat global maupun nasional. Untuk menghadapi kondisi ini, diperlukan strategi adaptasi yang matang dan kebijakan publik yang kuat serta terintegrasi, guna menjaga ketahanan dan kedaulatan pangan yang berkelanjutan dan merata bagi seluruh lapisan masyarakat Indonesia. Tantangan seperti ini juga menuntut inovasi dalam sistem pertanian dan distribusi pangan agar mampu merespons dinamika pasar serta faktor eksternal yang terus berubah. Sebagai respons terhadap tantangan pangan global, kolaborasi lintas negara dan sektor menjadi kunci untuk merancang sistem pangan yang tangguh, adil, dan mampu memenuhi kebutuhan manusia tanpa merugikan keberlanjutan lingkungan (Viona et al., 2025).

Dalam upaya membangun sistem pangan yang kuat dan berkelanjutan secara global, perhatian khusus perlu difokuskan pada wilayah dengan keterbatasan sumber daya yang paling signifikan, terutama lahan kering. Lahan kering merupakan sistem agroekosistem yang menghadapi tantangan biofisik kompleks akibat rendahnya ketersediaan air, terbatasnya bahan organik, serta kerentanan tinggi terhadap fluktuasi iklim dan erosi tanah. Menurut Stubbs et al. (2025), hampir separuh wilayah pertanian dunia dikategorikan sebagai lahan kering, di mana produktivitasnya sering terhambat oleh keterbatasan air dan degradasi sumber daya tanah. Pola tanam monokultur yang umum diterapkan mempercepat proses degradasi, mengurangi kesuburan jangka panjang, dan memperburuk ketidakseimbangan ekologis sistem pertanian. Dalam konteks tersebut, inovasi pengelolaan berbasis prinsip keberlanjutan dan efisiensi sumber daya menjadi keharusan untuk menjaga ketahanan pangan dan kesejahteraan petani di wilayah rawan kekeringan (Bowles et al., 2020).

Salah satu pendekatan yang mendapat perhatian luas adalah diversifikasi tanaman melalui sistem rotasi dan tumpangsari (*intercropping*). Penerapan kedua sistem tersebut diyakini mampu mengoptimalkan penggunaan air, meningkatkan efisiensi hara, serta memperkuat stabilitas produksi di bawah tekanan iklim kering (Yang et al., 2024). Kombinasi tanaman dengan pola perakaran, kebutuhan nutrisi, dan periode pertumbuhan yang berbeda memungkinkan pemanfaatan ruang dan waktu secara lebih optimal, sehingga menghasilkan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan sistem monokultur. Selain itu, diversifikasi juga berkontribusi terhadap peningkatan keanekaragaman fungsional dan kesehatan tanah. Dalam jangka panjang, sistem rotasi dan tumpangsari menunjukkan bahwa sistem pertanian yang menerapkan diversifikasi tanaman lebih resilien terhadap gangguan lingkungan dan fluktuasi cuaca ekstrem. Bowles et al. (2020) menemukan bahwa diversifikasi rotasi mampu mempertahankan hasil tanaman bahkan pada kondisi tumbuh yang tidak menguntungkan, sedangkan Huss et al. (2022) menegaskan bahwa tumpangsari dapat menekan risiko ekonomi melalui penyebaran risiko produksi dan harga. Oleh karena itu, integrasi rotasi dan tumpangsari tidak hanya relevan untuk menjaga stabilitas ekosistem pertanian, tetapi juga mendukung keberlanjutan ekonomi rumah tangga petani di daerah lahan kering.

Amandemen organik juga memiliki peran penting dalam memperbaiki struktur dan kesuburan tanah, khususnya di lahan kering yang menghadapi keterbatasan air dan hara. Dengan menambahkan bahan organik seperti kompos atau biochar, tanah menjadi lebih mampu menyimpan air karena peningkatan kapasitas menahan air (*water holding capacity*), sehingga suplai air bagi tanaman menjadi lebih stabil dan efisien. Selain itu, biochar juga meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), yang berarti tanah dapat menyimpan lebih banyak unsur hara dan mencegah hilangnya nutrisi akibat pencucian. Dengan kondisi tanah

yang lebih sehat dan kemampuan menahan air dan hara yang lebih baik, efisiensi pemanfaatan air dan hara oleh tanaman meningkat signifikan. Hal ini bukan hanya menunjang pertumbuhan tanaman yang optimal, tetapi juga mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan dengan mengurangi kebutuhan pestisida sintetik berlebih. Amandemen organik menjadi solusi efektif untuk meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem tanah (Nur et al., 2023).

Konsep agroekologi menjadi fondasi konseptual bagi pengembangan sistem rotasi-tumpangsari berkelanjutan dengan amandemen organik. Agroekologi menekankan pentingnya diversifikasi biotik, efisiensi energi, sirkulasi hara tertutup, dan sinergi antara komponen biotik dan abiotik dalam suatu sistem pertanian (Dittmer et al., 2023). Pendekatan ini menuntut keseimbangan antara dimensi ekologis dan sosial, termasuk pemanfaatan pengetahuan lokal, partisipasi petani, serta penguatan kelembagaan masyarakat. Dengan demikian, penerapan sistem diversifikasi berbasis agroekologi tidak hanya bertujuan meningkatkan hasil panen, tetapi juga memperkuat integritas ekosistem dan kemandirian petani. Meskipun efektivitas sistem diversifikasi telah banyak dibuktikan di berbagai ekosistem pertanian, masih terdapat kesenjangan informasi mengenai implementasinya pada lahan kering tropis. Sebagian besar studi terdahulu berfokus pada wilayah beriklim sedang, sementara kondisi tropis yang memiliki dinamika curah hujan tinggi dan tanah dengan kapasitas retensi air rendah masih belum banyak dieksplorasi (Mihrete & Mihretu, 2025).

Pendekatan agroekologi merupakan metode ilmiah yang dapat digunakan untuk mengatasi berbagai permasalahan pada lahan kering dengan mengoptimalkan proses-proses ekologis di dalam sistem pertanian. Pendekatan ini menempatkan diversifikasi tanaman sebagai salah satu strategi utama, berupa rotasi dan tumpangsari, untuk memaksimalkan pemanfaatan ruang, cahaya matahari, serta waktu penanaman, sekaligus memperbaiki siklus hara melalui interaksi sinergis antara akar tanaman dan mikroorganisme pengikat nitrogen (Yang et al., 2024). Selain itu, penggunaan amandemen organik sangat penting dalam memperbaiki struktur tanah, terutama dalam meningkatkan kapasitas tanah untuk menahan air (*water holding capacity*) dan kapasitas tukar kation (KTK). Peningkatan kedua kapasitas ini berkontribusi pada efisiensi pemanfaatan air dan hara, sehingga tanaman dapat tumbuh lebih optimal dalam kondisi lahan kering yang terbatas sumber dayanya (Nur et al., 2023). Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip agroekologi tersebut, diharapkan produksi pertanian di lahan kering dapat meningkat secara berkelanjutan tanpa merusak keseimbangan ekosistem. Selain faktor biofisik, dimensi sosial dan ekonomi juga menentukan keberhasilan implementasi sistem diversifikasi dan amandemen organik. Sharma et al. (2021) mengidentifikasi bahwa hambatan utama dalam penerapan rotasi dan tumpangsari di lahan kering adalah keterbatasan akses terhadap benih adaptif, rendahnya pengetahuan teknis petani, risiko pasar untuk komoditas alternatif, serta minimnya dukungan kebijakan.

Permasalahan utama yang melatarbelakangi penelitian ini adalah sistem pertanian lahan kering yang tengah bergulat dengan degradasi tanah yang terus memburuk, hilangnya kesuburan karena erosi dan kehabisan nutrisi, serta ketergantungan pada monokultur yang rawan hama-penyakit sehingga semua ini mengancam kelestarian produksi pangan dan ketahanan pangan petani kecil. Pendekatan agroekologi berupa rotasi dan tumpangsari memang telah menunjukkan kemampuan untuk memperkaya diversitas tanaman, mengoptimalkan siklus hara, serta mengendalikan hama secara alami, tetapi penerapannya masih terbentur keterbatasan bahan organik setempat dan ketidaksesuaian dengan iklim kering yang tidak menentu. Integrasi amandemen organik seperti kompos serta pupuk hijau dengan pola rotasi-tumpangsari pun belum optimal, sehingga kurang efektif dalam memulihkan struktur tanah, menyimpan air, dan menjaga produktivitas berkelanjutan. Karenanya, inti rumusan masalah penelitian ini terletak pada upaya merancang serta menguji integrasi rotasi-tumpangsari dengan amandemen organik guna memperkuat keberlanjutan pertanian lahan kering yang diukur melalui indikator kesuburan tanah, kestabilan hasil panen, dan daya saing ekonomi petani.

Penelitian ini bertujuan merancang, menguji, dan mengevaluasi integrasi rotasi-tumpangsari dengan amandemen organik untuk memperkuat keberlanjutan pertanian lahan kering di Indonesia, khususnya mengatasi degradasi tanah, dominasi monokultur, serta

keterbatasan sumber daya lokal. Studi ini mengidentifikasi kombinasi rotasi-tumpangsari serta amandemen organik seperti kompos dan pupuk hijau yang paling sesuai iklim kering tidak menentu; mengukur pengaruh terhadap kesuburan tanah melalui peningkatan bahan organik, struktur agregat, dan kemampuan retensi air; menilai kemampuan dalam menstabilkan produksi panen, mengendalikan hama secara alami, serta mengurangi erosi; serta menganalisis keunggulan ekonomi petani kecil berdasarkan rasio biaya-manfaat, laba bersih, dan ketahanan pangan berkelanjutan. Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, penulis mengkaji pendekatan integrasi rotasi-tumpangsari dan amandemen organik dalam optimalisasi efisiensi hara-air menuju keberlanjutan sistem pertanian di lahan kering.

## METODE

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan *literature review* sistematis dengan mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis literatur relevan sebanyak 20 artikel ilmiah yang lolos seleksi akhir. Artikel tersebut terdiri atas 4 artikel dari *MDPI*, 2 artikel dari *SpringerLink*, 3 artikel dari *Frontiers*, 11 artikel dari *Google Scholar* dari jurnal internasional maupun nasional terindeks SINTA terkait analisis pola tanam rotasi-tumpangsari dikombinasikan dengan aplikasi bahan organik seperti kompos dan pupuk kandang, serta evaluasi dampaknya terhadap kualitas tanah dan pengelolaan hara-air. Kriteria inklusi dan eksklusi diterapkan untuk menyaring artikel, hingga akhirnya artikel dipilih setelah melewati penilaian kualitas menggunakan kriteria. Data dari artikel-artikel tersebut dianalisis menggunakan pendekatan tematik untuk mengidentifikasi pola dan sintesis naratif untuk menggambarkan pentingnya keberlanjutan sistem pertanian lahan kering melalui pengelolaan pola tanam dan perbaikan kualitas tanah dengan bahan organik guna meningkatkan ketahanan terhadap keterbatasan air dan nutrisi yang sering terjadi di lahan kering.

Pencarian literatur sistematis dilakukan melalui berbagai database dengan rentang tahun 2020-2025 dengan kata kunci gabungan yakni rotasi tanaman, tumpangsari, lahan kering, dryland, amandemen organik, organic amendment, keberlanjutan, sustainability, memperoleh 125 dokumen awal. Pasca pembersihan duplikat menggunakan Mendeley (menyisakan 78 artikel), skrining judul-abstrak dengan kriteria inklusi yaitu fokus rotasi-tumpangsari atau amandemen organik, latar lahan kering, dan bukti empiris lapangan menghasilkan 28 artikel layak lanjut. Pada akhir proses, 20 artikel terpilih untuk sintesis naratif serta meta-analisis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *systematic literature review* dalam naskah ini ambil dari tahun 2020–2025 yang menjadi dasar sintesis tematik dan naratif dalam penelitian. Ringkasan difokuskan pada jenis sistem rotasi-tumpangsari, bentuk amandemen organik (misalnya kompos, pupuk kandang, biochar, residu hijau), serta dampaknya terhadap indikator kunci lahan kering, seperti kandungan bahan organik tanah, struktur dan porositas, kapasitas menahan air (WHC), kapasitas tukar kation (KTK), dinamika hara (N, P, K), aktivitas mikroba tanah, stabilitas hasil, serta aspek konservasi (erosi) dan ketahanan terhadap cekaman iklim. Dengan demikian, data tersebut berfungsi sebagai peta bukti (evidence map) yang memperlihatkan pola temuan utama dan kontribusi masing-masing studi terhadap penguatan argumen integrasi diversifikasi tanaman dan amandemen organik dalam pertanian lahan kering berkelanjutan. Adapun hasil tersebut disajikan dalam tabel berikut.

**Tabel 1.** Data Artikel yang di review

No	Nama Penulis	Judul	Ringkasan Hasil/Pembahasan
1	Moreira et al. (2024)	Intercropping Systems: Opportunity Environment Conservation within Production	An for Nut Tumpangsari tidak hanya menanam dua atau lebih tanaman bersamaan, tetapi juga memanfaatkan interaksi ekologis seperti kompetisi, sinergi, dan mikroba akar untuk efisiensi sumber daya. Kombinasi tanaman memaksimalkan serapan hara dan air, serta meningkatkan keanekaragaman mikroba tanah yang mendukung

No	Nama Penulis	Judul	Ringkasan Hasil/Pembahasan
2	Nurmasasinta et al. (2022)	Konsentrasi Hara N , P dan Hasil Panen pada Tumpangsari Jagung- Kedelai yang Ditambahkan Mikoriza dan Sumber Nutrisi di Lahan Kering Lombok Utara	produktivitas. Praktik ini mengoptimalkan lahan, meningkatkan keanekaragaman hayati, serta hasil dan kualitas panen, terutama pada kacang-kacangan. Tumpangsari juga meningkatkan pendapatan petani dan menjadi solusi berkelanjutan di tengah tekanan lingkungan akibat pertumbuhan populasi dan intensifikasi pertanian, meskipun tantangan dan keterbatasan tetap ada di berbagai wilayah.
3	Huss et al. (2022)	Benefits and Risks of Intercropping for Crop Resilience and Pest Management	Dalam membandingkan beberapa sistem tumpangsari jagung-legum dengan monokultur dan menemukan bahwa selama tiga hingga empat tahun, sistem <i>intercropping</i> menghasilkan nilai total produksi yang lebih tinggi atau setara, sambil mempertahankan sebagian besar parameter kesuburan tanah. Amandemen organik meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan nutrien dengan memberikan bahan organik, memperbaiki agregasi tanah, dan merangsang aktivitas mikroba tanah yang memfasilitasi mineralisasi serta pelarutan nutrien.
4	Williams et al. (2023)	Cropping System Diversification Influences Soil Microbial Diversity in Subtropical Dryland Farming Systems	Konfigurasi temporal mempengaruhi keseimbangan antara produktivitas dan risiko kompetisi. Hal ini menunjukkan dinamika produktivitas dalam sistem rotasi- tumpangsari di lahan kering sangat dipengaruhi oleh desain sistem (kombinasi tanaman, waktu, jarak tanam) dan interaksi ekologis yang kompleks. Keuntungan produktivitas dapat tercapai jika tanaman memilih pasangan yang saling melengkapi (bukan bersaing), serta manajemen air dan hara dilakukan secara adaptif.

No	Nama Penulis	Judul	Ringkasan Hasil/Pembahasan
5	Li et al. (2025)	Crop Diversification Improves Productivity and Soil Health By Regulating Fungal Diversity	Diversifikasi tanaman melalui rotasi-tumpangsari meningkatkan indikator kesehatan tanah seperti porositas, stabilitas agregat tanah, kandungan karbon organik dan nitrogen mudah terakses dibandingkan dengan sistem monokultur.
6	Choudhary et al. (2025)	Diversified Cropping Systems For Improving The Crop Productivity and Soil Health Of Dryland Ecosystem	Tumpangsari jagung-legum menghasilkan peningkatan jumlah bakteri pengurai sebesar 40% dan fungi mikoriza sebesar 25% dibandingkan sistem monokultur. Interaksi ini memperkuat siklus hara, meningkatkan ketersediaan fosfor, dan menstimulasi pertumbuhan akar tanaman.
7	Zhao et al. (2021)	Effects of Organic Amendments on the Improvement of Soil Nutrients and Crop Yield in Sandy Soils during a 4-Year Field Experiment in Huang-Huai-Hai Plain, Northern China	Amandemen organik seperti kompos, pupuk kandang, biochar, dan residu hijau memiliki peran penting dalam meningkatkan kemampuan tanah untuk menyimpan air ( <i>water holding capacity/WHC</i> ) dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Dengan peningkatan kapasitas ini, kehilangan mineral yang larut dalam air menjadi lebih lambat, sehingga unsur hara yang dibutuhkan tanaman dapat tersedia lebih lama. Efek ini sangat terlihat pada tanah berpasir yang rendah kandungan bahan organik, terutama di lahan kering, di mana amandemen organik mampu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah sehingga air dan hara terjaga lebih baik untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.
8	Amalina et al. (2024)	Peran Biochar Dalam Meningkatkan Kesuburan Tanah Dan Retensi Air	Biochar memiliki kemampuan untuk meningkatkan retensi air pada tanah berpasir melalui struktur pori-porinya yang luas, sehingga membantu mengurangi kehilangan air akibat aliran permukaan. Selain itu, biochar juga dapat mengikat fosfor (P) sehingga mengurangi risiko kehilangan unsur hara tersebut. Efektivitas biochar dipengaruhi oleh jenis, dosis, serta interaksinya dengan bahan organik lain di tanah.
9	Abbas et al. (2024)	The Efficiency of Organic Amendments on Maize Productivity , Soil Properties and Active Fractions of Soil Carbon in Organic-Matter Deficient Soil	Meta-analisis menunjukkan bahwa biochar dapat memperbaiki sifat fisik tanah secara signifikan, meskipun respons hasil pertanian yang diperoleh bervariasi antar penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa dampak biochar pada tanaman tergantung pada kondisi spesifik lingkungan dan karakteristik tanah setempat.
10	Toda et al. (2023)	Organic Management and Soil Health	Kombinasi amandemen organik, konservasi tanah, dan inokulan mikroba meningkatkan kapasitas tanah menyimpan

No	Nama Penulis	Judul	Ringkasan Hasil/Pembahasan
		Promote Nutrient Use Efficiency	air, struktur tanah, serta kandungan karbon organik tanah (SOC). Bahan organik dan karbon merangsang aktivitas mikroba, sehingga pelepasan hara lebih sinkron dengan kebutuhan tanaman. Dukungan praktik konservasi seperti minim gangguan tanah, mulsa, dan inoculan hayati berkontribusi pada efisiensi hara dan air, serta memperkuat resiliensi agroekosistem lahan kering. Nitrogen sebagai nutrisi utama sering diserap kurang dari 50%, sisanya mencemari lingkungan.
11	Ankomah et al. (2024)	Integrating Cover Crops and Organic Amendments To Mitigate The Limitations Of Tillage On Soil Health And Cotton Productivity	Konsistensi peningkatan efisiensi penggunaan air dan hara serta stabilitas tanah di berbagai sistem lahan, tetapi besarnya optimalisasi dipengaruhi oleh jenis tanaman, iklim, komposisi amandemen organik, serta rancangan rotasi yang diterapkan.
12	Dewi et al. (2017)	Upaya Efisiensi Pemanfaatan Lahan Melalui Sistem Tanam Tumpangsari Sorgum Dengan Kacang- Kacangan di Lahan Kering	Diversifikasi pangan dan ekstensifikasi di lahan kering diperlukan, meski lahan kering Indonesia masih kurang dimanfaatkan akibat keterbatasan air dan erosi. Tumpangsari menjadi strategi efisiensi air dan lahan, dengan tanaman sela berperan sebagai cover crop, mengurangi evaporasi dan erosi. Tumpangsari dilakukan dengan memilih kombinasi tanaman yang tepat, seperti sorgum sebagai tanaman pokok karena tahan kekeringan dan sumber karbohidrat-protein, serta leguminoseae sebagai tanaman sela untuk menambah hara N dan protein nabati murah.
13	Abshiba et al. (2025)	A Comprehensive Review Of Soil Quality Indicators Under Diverse Land Uses In Rainfed Areas	Pengelolaan lahan kering yang mengintegrasikan rotasi, tumpangsari, dan amandemen organik membutuhkan studi jangka panjang ( $\geq 5$ tahun) untuk mengukur perubahan stok karbon (C) dan dinamika nitrogen (N), membedakan fraksi C labil dan recalcitrant, serta mengevaluasi efek kumulatif pada produktivitas dan efisiensi NUE. Studi jangka pendek hanya menangkap respons awal, belum mencerminkan stabilisasi ekosistem. Riset mendalam diperlukan untuk mengoptimalkan kombinasi tanaman dan amandemen organik sesuai agroklimat, termasuk tipe dan tekstur tanah setempat.
14	Syahruddin et al. (2023)	Adaptation Of Several Hybrid Maize In West Nusa Tenggara Drylands Using	Pemilihan varietas jagung hibrida, seperti JH-37 dan JH-29, yang dipadukan dengan pengaturan jarak tanam adaptif dapat meningkatkan hasil biji dan biomassa secara signifikan pada lahan berair

No	Nama Penulis	Judul	Ringkasan Hasil/Pembahasan
		Modified Spacing For Optimal Seed and Biomass Productions	terbatas. Pendekatan ini mencerminkan pentingnya basis genetika dalam strategi adaptasi agroekosistem kering untuk menjaga stabilitas produksi. Selain aspek varietas, penataan pola tanam memainkan peran fundamental dalam optimalisasi produktivitas. Manajemen air menjadi komponen paling kritis dalam mengoptimalkan sistem diversifikasi.
15	Rejekiningrum et al. (2022)	Optimising Water Management in Drylands to Increase Crop Productivity and Anticipate Climate Change in Indonesia.	Integrasi irigasi suplementer, teknik panen air, dan tata kelola air berbasis komunitas dapat meningkatkan indeks tanam sekaligus memperbaiki efisiensi air. Strategi ini tidak hanya mendukung keberlanjutan ekosistem pertanian, tetapi juga memperkuat daya adaptif petani terhadap perubahan iklim yang ekstrem. Penerapan irigasi parsial sebesar 80% dari rekomendasi FAO mampu meningkatkan produktivitas serta efisiensi air hingga 25% di wilayah tropis semi-arid. Pemanenan air hujan sistem embung mikro, dan penutupan permukaan tanah dengan mulsa organik merupakan praktik yang memperpanjang ketersediaan kelembaban tanah serta mengurangi kehilangan air melalui evaporasi.
16	Keteku et al. (2024)	Plant Nutrition in Relation to Water-use Efficiency in Crop Production: A review	Penggunaan mulsa organik, penataan ulang jarak tanam, serta amandemen organik mampu menekan evaporasi dan meningkatkan water-use efficiency (WUE). Teknik ini tidak hanya memperbaiki kondisi fisik tanah, tetapi juga meningkatkan retensi air dan aktivitas mikroorganisme, yang merupakan komponen penting dalam sistem pertanian berbasis agroekologi. Pendekatan berbasis lokasi ( <i>site-specific management</i> ) menjadi syarat utama bagi keberhasilan diversifikasi.
17	Suswatiningsih & Anshori (2023)	The Strategy of Soybean Development on Dryland Agroecosystem in Gunungkidul Regency, D.I. Yogyakarta, Indonesia	Di wilayah Gunungkidul, kombinasi teknologi tanam spesifik, sistem irigasi mikro, dan pengaturan kalender tanam yang tepat mampu memperkuat performa kedelai di ekosistem kering. Hal ini menunjukkan optimalisasi tidak dapat dilakukan secara generik, melainkan harus mempertimbangkan kondisi pedo-klimatik, topografi, dan ketersediaan air lokal.
18	Paramesh et al. (2023)	Integrated Nutrient Management For Improving Crop Yields , Soil Properties , and Reducing Greenhouse Gas	Penurunan hasil panen di banyak negara agraris terkait dengan rendahnya bahan organik tanah (SOM) akibat sifat fisik, kimia, dan biologis tanah yang buruk. Penerapan pengelolaan nutrisi terpadu (INM) sangat penting untuk memulihkan kesehatan tanah secara berkelanjutan

No	Nama Penulis	Judul	Ringkasan Hasil/Pembahasan
19	Bowles et al. (2020)	Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America	Emissions tanpa mengurangi potensi hasil panen. INM merupakan pendekatan modifikasi teknik nutrisi dengan memadukan semua sumber nutrisi tanaman yang tersedia. Studi global menunjukkan INM meningkatkan kesehatan tanah dan hasil panen secara signifikan, sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca dan masalah lingkungan terkait. Strategi seperti diversifikasi agroekosistem melalui rotasi tanaman dapat meningkatkan ketahanan terhadap cuaca ekstrem tanpa mengurangi hasil panen. Analisis regresi multilevel pada data hasil panen jagung jangka panjang menunjukkan rotasi beragam meningkatkan hasil rata-rata 28,1%, bahkan hingga 22,6% di kondisi ideal, serta mengurangi kehilangan hasil 14,0%–89,9% saat kekeringan. Diversifikasi rotasi tanaman menjadi strategi sentral untuk ketahanan hasil dan pengurangan risiko, sekaligus dasar kebijakan pertanian berkelanjutan.
20	Nur et al. (2023)	Pengaruh Amandemen Tanah dan Varietas Terhadap Aktivitas Aantioksidan Tanaman Padi ( <i>Oryza sativa</i> L.) Pada Kondisi Cekaman Salinitas	Penggunaan amandemen organik sangat penting dalam memperbaiki struktur tanah, terutama dalam meningkatkan kapasitas tanah untuk menahan air ( <i>water holding capacity</i> ) dan kapasitas tukar kation (KTK). Peningkatan kedua kapasitas ini berkontribusi pada efisiensi pemanfaatan air dan hara, sehingga tanaman dapat tumbuh lebih optimal dalam kondisi lahan kering yang terbatas sumber daya.

## Pembahasan

### Dampak Integrasi Rotasi-Tumpangsari terhadap Efisiensi Pemanfaatan Sumber Daya

Praktik tumpangsari (*intercropping*) dan rotasi tanaman secara bersamaan telah banyak diusulkan sebagai strategi untuk meningkatkan output pertanian per satuan lahan, terutama di kondisi lahan kering yang sumber daya (air dan nutrisi) terbatas. Tumpangsari dapat menghasilkan produktivitas yang lebih tinggi dibanding monokultur dan efisiensi lahan yang meningkat karena tanaman yang berbeda memanfaatkan ruang, cahaya, dan nutrisi secara lebih komplementer. Dalam tinjauan komprehensif yang lebih baru, Moreira et al. (2024) menekankan bahwa *intercropping* bukan hanya soal menanam dua atau lebih tanaman secara bersamaan, tetapi bagaimana interaksi ekologis (seperti kompetisi, sinergi, mikroba akar) mendasari efisiensi penggunaan sumber daya. Penggunaan tanaman kombinasi bisa memaksimalkan serapan hara dan air, serta meningkatkan keanekaragaman mikroba tanah yang mendukung produktivitas. Studi lapang jangka menengah juga memberikan bukti empiris bahwa tumpangsari dapat mempertahankan atau bahkan meningkatkan produktivitas dalam jangka waktu beberapa tahun. Menurut Nurmasasinta et al. (2022), dalam membandingkan beberapa sistem tumpangsari jagung-legum dengan monokultur dan menemukan bahwa selama tiga hingga empat tahun, sistem *intercropping* menghasilkan nilai total produksi yang lebih tinggi atau setara, sambil mempertahankan sebagian besar parameter kesuburan tanah.

Keterbatasan air dalam pertanian lahan kering sering menjadi faktor penentu utama. Jika dua tanaman dalam sistem tumpangsari memerlukan air pada fase yang sama secara

intensif, kompetisi bisa memicu penurunan hasil tanaman tunggal. Oleh karena itu, rotasi waktu tanam atau penanaman selang (*relay intercropping*) bisa menjadi strategi untuk mengurangi overlap kebutuhan air. Penelitian Huss et al. (2022) mengemukakan bagaimana konfigurasi temporal mempengaruhi keseimbangan antara produktivitas dan risiko kompetisi. Hal ini menunjukkan dinamika produktivitas dalam sistem rotasi–tumpangsari di lahan kering sangat dipengaruhi oleh desain sistem (kombinasi tanaman, waktu, jarak tanam) dan interaksi ekologis yang kompleks. Keuntungan produktivitas dapat tercapai jika tanaman memilih pasangan yang saling melengkapi (bukan bersaing), serta manajemen air dan hara dilakukan secara adaptif.

Diversifikasi tanaman, baik melalui rotasi maupun tumpangsari, terbukti mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Williams et al. (2023) meneliti sistem rotasi di lahan kering dan mengemukakan bahwa diversifikasi rotasi secara signifikan menggeser komunitas mikroba tanah dan meningkatkan aktivitas biokimia tanah. Selain itu, diversifikasi tanaman memperkuat kandungan karbon organik tanah (SOC) yang berperan dalam mempertahankan kelembapan dan stabilitas agregat. Hal ini sangat relevan untuk mempertahankan fungsi ekosistem di wilayah tropis kering seperti Nusa Tenggara Barat dan Nusa Tenggara Timur. Menurut Li et al. (2025), dalam penelitiannya menyebutkan bahwa diversifikasi tanaman melalui rotasi-tumpangsari meningkatkan indikator kesehatan tanah seperti porositas, stabilitas agregat tanah, kandungan karbon organik dan nitrogen mudah terakses dibandingkan dengan sistem monokultur.

Secara biologis, sistem rotasi-tumpangsari juga meningkatkan keanekaragaman mikroba tanah. Dalam penelitian Choudhary et al. (2025), menunjukkan bahwa tumpangsari jagung-legum menghasilkan peningkatan jumlah bakteri pengurai sebesar 40% dan fungi mikoriza sebesar 25% dibandingkan sistem monokultur. Interaksi ini memperkuat siklus hara, meningkatkan ketersediaan fosfor, dan menstimulasi pertumbuhan akar tanaman. Secara fisika, sistem tumpangsari membantu memperbaiki porositas tanah dan infiltrasi air. Secara kimia, diversifikasi tanaman juga mempengaruhi rasio C/N tanah, memperbaiki ketersediaan unsur hara makro (N, P, K), serta menstabilkan pH tanah (Williams et al., 2023). Dampak positif lainnya ialah penurunan ketergantungan terhadap pestisida sintetik. Dengan meningkatnya biomassa residu tanaman, petani dapat memanfaatkan limbah tanaman sebagai pupuk organik. Efisiensi ini penting untuk pertanian berkelanjutan di lahan kering. Dari perspektif produktivitas, sistem tumpangsari juga meningkatkan Land Equivalent Ratio (LER) secara signifikan. Dengan demikian, diversifikasi tanaman berbasis agroekologi berperan penting dalam menjaga keberlanjutan lahan kering.

### **Peran Amandemen Organik dalam Peningkatan Efisiensi Hara dan Kapasitas Retensi Air**

Amandemen organik seperti kompos, pupuk kandang, biochar, dan residu hijau memiliki peran penting dalam meningkatkan kemampuan tanah untuk menyimpan air (*water holding capacity/WHC*) dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Dengan peningkatan kapasitas ini, kehilangan mineral yang larut dalam air menjadi lebih lambat, sehingga unsur hara yang dibutuhkan tanaman dapat tersedia lebih lama. Efek ini sangat terlihat pada tanah berpasir yang rendah kandungan bahan organik, terutama di lahan kering, di mana amandemen organik mampu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah sehingga air dan hara terjaga lebih baik untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal (Zhao et al., 2021). Penggunaan amandemen organik memberikan dampak jangka panjang yang penting terhadap peningkatan kandungan karbon tanah, sehingga menjadi elemen utama dalam upaya mengurangi degradasi tanah di lahan kering. Peningkatan stok karbon organik tanah (SOC) sangat berhubungan dengan kemampuan tanah untuk menyimpan air, yang membantu tanah lebih tahan terhadap kondisi kekeringan yang berlangsung lama. Hal ini menegaskan peran penting amandemen organik dalam menjaga kualitas tanah dan mendukung keberlanjutan pertanian di lahan kering.

Amandemen organik yang saat ini menjadi perhatian khusus dalam konteks lahan kering adalah biochar. Biochar memiliki kemampuan untuk meningkatkan retensi air pada tanah berpasir melalui struktur pori-porinya yang luas, sehingga membantu mengurangi kehilangan air akibat aliran permukaan. Selain itu, biochar juga dapat mengikat fosfor (P) sehingga mengurangi risiko kehilangan unsur hara tersebut. Efektivitas biochar dipengaruhi

oleh jenis, dosis, serta interaksinya dengan bahan organik lain di tanah (Amalina et al., 2024). Meta-analisis menunjukkan bahwa biochar dapat memperbaiki sifat fisik tanah secara signifikan, meskipun respons hasil pertanian yang diperoleh bervariasi antar penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa dampak biochar pada tanaman tergantung pada kondisi spesifik lingkungan dan karakteristik tanah setempat (Abbas et al., 2024).

Selain biochar, penggunaan kompos dan pupuk kandang secara signifikan meningkatkan kandungan karbon organik tanah (SOC) serta merangsang aktivitas mikroorganisme tanah. Peningkatan ini berdampak pada perbaikan struktur tanah, khususnya agregasi dan porositasnya, yang berujung pada meningkatnya daya serap air dan pengurangan penguapan dari permukaan tanah. Kondisi tersebut sangat penting bagi lahan kering, karena memungkinkan air hujan lebih optimal tersimpan dan dimanfaatkan oleh tanaman, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan air di lingkungan dengan ketersediaan air yang terbatas. Penggunaan bahan organik pada lahan kering memiliki beberapa risiko dan keterbatasan yang perlu diperhatikan. Kualitas bahan organik, seperti rasio karbon terhadap nitrogen (C:N) dan kemungkinan adanya kontaminan, menjadi faktor penting. Selain itu, ketersediaan bahan organik dari sumber lokal sering kali terbatas, dan proses pengangkutan serta penerapannya di lapangan dapat menjadi tantangan tersendiri. Jika bahan organik memiliki rasio C:N yang sangat tinggi, pelepasan nitrogen dari bahan tersebut bisa melambat dan menyebabkan nitrogen terserap oleh mikroorganisme tanah sementara waktu, sehingga mengurangi jumlah hara nitrogen yang tersedia untuk tanaman dalam jangka pendek. Oleh sebab itu, pengelolaan bahan organik harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak menghambat pertumbuhan tanaman. (Zhao et al., 2021).

Kombinasi amandemen organik dengan praktik konservasi tanah dan inokulan mikroba meningkatkan kapasitas tanah untuk menyimpan air (WHC), memperbaiki struktur tanah, serta menambah kandungan karbon organik tanah (SOC) (Toda et al., 2023). Amandemen menyediakan bahan organik dan karbon yang merangsang aktivitas mikroba, sehingga pelepasan unsur hara mengikuti kebutuhan tanaman secara lebih sinkron. Dengan dukungan praktik konservasi seperti minimnya gangguan tanah, mulsa, dan penggunaan inokulan hayati, strategi ini berkontribusi esensial terhadap optimalisasi efisiensi hara dan air melalui mekanisme yang memperkuat resiliensi agroekosistem spesifik pada kondisi cekaman lingkungan lahan kering. Namun keberhasilan intervensi sangat bergantung pada kualitas bahan amandemen (misalnya kompos, biochar, residu tanaman) serta cara pengelolaannya (dosis, waktu, penempatan), sehingga diperlukan evaluasi untuk memastikan respons tanaman, stabilitas tanah, dan penghematan pupuk.

### **Sinergi Integrasi Rotasi-Tumpangsari dan Amandemen Organik pada Lahan Kering**

Kombinasi antara rotasi atau tumpangsari dengan amandemen organik menunjukkan potensi sinergis yang berarti untuk praktik pertanian berkelanjutan. Rotasi atau tumpangsari meningkatkan pemanfaatan air dan nutrien melalui diversifikasi tanaman, peningkatan struktur tanah, serta aliran hara yang melibatkan jaringan akar yang berbeda dan komunitas mikroba rhizosfer yang beragam. Sementara itu, amandemen organik meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan nutrien dengan memberikan bahan organik, memperbaiki agregasi tanah, dan merangsang aktivitas mikroba tanah yang memfasilitasi mineralisasi serta pelarutan nutrien (Nurmasasinta et al., 2022). Gabungan keduanya cenderung menghasilkan peningkatan lebih besar pada ketersediaan air-hara, efisiensi penggunaan nutrien, dan produktivitas tanaman dibandingkan penerapan tunggal. Menurut Ankomah et al. (2024), menunjukkan konsistensi peningkatan efisiensi penggunaan air dan hara serta stabilitas tanah di berbagai sistem lahan, tetapi besarnya optimalisasi dipengaruhi oleh jenis tanaman, iklim, komposisi amandemen organik, serta rancangan rotasi yang diterapkan.

Integrasi antara sistem rotasi dan tumpangsari dengan pemakaian amandemen organik di lahan kering memberikan hasil yang sangat positif dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan. Sistem tumpangsari, dengan menanam jagung dan kacang hijau secara bersamaan, terbukti menambah efisiensi penggunaan lahan dan air, sekaligus mengurangi kehilangan air melalui evaporasi. Amandemen organik yang diaplikasikan, seperti kompos atau pupuk kandang, memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kandungan bahan organik, sehingga tanah mampu menahan air lebih lama dan

menyediakan hara penting yang dibutuhkan tanaman selama fase pertumbuhan. Penelitian Dewi et al. (2017), menunjukkan bahwa kombinasi parit yang diisi bahan organik dengan pola tanam tumpangsari dapat meningkatkan indeks luas daun jagung hingga 40%, hasil panen jagung mencapai 6,258 ton per hektar, dan efisiensi penggunaan air naik sekitar 60,8% jika dibandingkan dengan monokultur tanpa amandemen. Metode ini menciptakan kondisi pertanian yang lebih stabil dan produktif di lahan kering, sekaligus mendukung praktik pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan. Pendekatan ini juga membuka peluang pengembangan teknologi pengelolaan amandemen yang diselaraskan dengan siklus tanam untuk hasil yang lebih optimal.

Implementasi sinergi ini memerlukan manajemen yang cermat pada tiga elemen utama yaitu waktu aplikasi organik yang tepat (sebelum tanam atau sebagai mulsa), dosis yang disesuaikan dengan rasio C:N bahan organik, dan pemilihan pasangan tanaman untuk tumpangsari yang memperhatikan dinamika akar, kebutuhan nutrien, serta aktivitas mikroba rhizosfer, agar pelepasan hara sejalan dengan fase pertumbuhan kritis tanaman. Tanpa sinkronisasi pelepasan hara dan kebutuhan tanaman, risiko immobilisasi nutrien atau persaingan sumber daya bisa meningkat, sehingga desain praktik yang terintegrasi dan disesuaikan konteks sangat penting untuk mencapai efisiensi nutrien dan stabilitas produksi secara konsisten (Zhao et al., 2021). Riset lanjutan sangat penting untuk memperkuat dasar ilmiah pengelolaan lahan kering yang mengintegrasikan rotasi, tumpangsari, dan amandemen organik, dengan fokus pada dua aspek utama yakni diperlukan studi jangka panjang ( $\geq 5$  tahun) untuk secara akurat mengukur perubahan stok karbon (C) dan dinamika nitrogen (N), guna membedakan antara fraksi karbon labil dan yang recalcitrant, serta mengevaluasi efek kumulatif pada produktivitas dan efisiensi penggunaan nitrogen (NUE) dalam waktu yang cukup untuk menunjukkan stabilisasi ekosistem. Studi jangka pendek cenderung hanya menangkap respons awal yang belum mencerminkan proses stabilisasi jangka panjang. Kemudian, riset mendalam diperlukan untuk mengoptimalkan kombinasi spesifik antara komoditas tanaman dan jenis amandemen organik yang paling sesuai dengan kondisi agroklimat setempat, termasuk tipe dan tekstur tanah (misalnya, pasir atau lempung). Pendekatan kontekstual ini akan menghasilkan panduan teknis yang lebih operasional dan berbasis bukti bagi petani, memastikan praktik pertanian berkelanjutan benar-benar adaptif dan efektif untuk konservasi sumber daya dalam jangka panjang (Abshiba et al., 2025).

### Keberlanjutan Sistem Pertanian Lahan Kering

Desain rotasi tanaman yang memasukkan legum, pemilihan pasangan tumpangsari yang saling membantu dan tidak berebut sumber daya yang terbatas, serta penerapan amandemen organik seperti kompos, biochar, atau pupuk kandang pada dosis yang disesuaikan, merupakan strategi terintegrasi untuk meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air (WHC) dan kapasitas pertukaran kation (KTK). Penerapan ini sangat relevan pada lahan bertekstur ringan, di mana retensi air dan dinamika hara cenderung lebih rentan terhadap gangguan lingkungan. Legum berkontribusi pada suplai nitrogen biologis melalui symbiosis Rhizobium, sehingga mengurangi kebutuhan pestisida sintetik, sementara amandemen organik menyediakan sumber karbon yang meningkatkan agregasi tanah dan aktivitas mikroba, yang pada gilirannya mempercepat mineralisasi serta pelarutan hara. Gabungan ketiganya menghasilkan peningkatan efisiensi penggunaan nutrien dan stabilitas fisik tanah, terutama selama fase pertumbuhan kritis tanaman. Keberhasilan penerapan rekomendasi ini sangat bergantung pada penyesuaian dengan kondisi lokal lahan kering, terutama terkait dengan tekstur tanah, iklim, ketersediaan bahan organik yang berkualitas, serta pengaturan dosis dan waktu aplikasi yang tepat. Penyesuaian tersebut penting agar manfaat yang diperoleh dapat dimaksimalkan, khususnya pada lahan dengan tekstur ringan, sehingga mendukung produktivitas dan keberlanjutan pengelolaan lahan kering secara optimal (Nurmasasinta et al., 2022).

Waktu yang tepat untuk mengaplikasikan amandemen organik sangat penting dalam menjaga keseimbangan nutrisi dan air pada lahan kering. Amandemen seperti kompos, pupuk kandang, dan biochar sebaiknya diberikan sekitar 2–3 minggu sebelum penanaman agar proses penguraian bahan organik berjalan baik dan nutrisi siap tersedia saat tanaman memulai fase pertumbuhan awal. Penelitian oleh Zhao et al. (2021) mengungkapkan bahwa

menyesuaikan waktu aplikasi ini dengan fase pertumbuhan akar yang aktif dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen mineral hingga 18% dan mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian sampai 30%. Pendekatan ini juga mencegah efek sementara yang membuat nitrogen tidak tersedia bagi tanaman saat bahan organik dengan rasio C/N tinggi masuk ke tanah. Dengan demikian, menyelaraskan aplikasi amandemen dengan siklus tanaman dapat meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi dan air, sekaligus menjaga kesehatan tanah secara berkelanjutan di kondisi lahan kering.

Peningkatan efektivitas sistem diversifikasi tanaman pada lahan kering membutuhkan pendekatan integratif yang menitikberatkan pada seleksi varietas tanaman yang adaptif terhadap cekaman air serta fluktuasi iklim. Kajian oleh Syahruddin et al. (2023) menegaskan bahwa pemilihan varietas jagung hibrida, seperti JH-37 dan JH-29, yang dipadukan dengan pengaturan jarak tanam adaptif dapat meningkatkan hasil biji dan biomassa secara signifikan pada lahan berair terbatas. Pendekatan ini mencerminkan pentingnya basis genetika dalam strategi adaptasi agroekosistem kering untuk menjaga stabilitas produksi. Selain aspek varietas, penataan pola tanam memainkan peran fundamental dalam optimalisasi produktivitas. Manajemen air menjadi komponen paling kritikal dalam mengoptimalkan sistem diversifikasi. Rejekiningrum et al. (2022) melalui penelitian di beberapa wilayah Indonesia menunjukkan bahwa integrasi irigasi suplementer, teknik panen air, dan tata kelola air berbasis komunitas dapat meningkatkan indeks tanam sekaligus memperbaiki efisiensi air. Strategi ini tidak hanya mendukung keberlanjutan ekosistem pertanian, tetapi juga memperkuat daya adaptif petani terhadap perubahan iklim yang ekstrem.

Penelitian Rejekiningrum et al. (2022), menunjukkan bahwa penerapan irigasi parsial sebesar 80% dari rekomendasi FAO mampu meningkatkan produktivitas serta efisiensi air hingga 25% di wilayah tropis semi-arid. Pemanenan air hujan sistem embung mikro, dan penutupan permukaan tanah dengan mulsa organik merupakan praktik yang memperpanjang ketersediaan kelembaban tanah serta mengurangi kehilangan air melalui evaporasi. Pendekatan ini selaras dengan prinsip agroekologi dalam meningkatkan daya lenteng ekosistem melalui efisiensi penggunaan sumber daya. Diversifikasi tanaman yang dirancang melalui rotasi atau tumpangsari menjadi instrumen fundamental dalam meningkatkan ketahanan agroekosistem. Integrasi tanaman berakar dangkal dan dalam membantu memanfaatkan profil tanah secara vertikal, sehingga efisiensi penyerapan hara dan air meningkat.

Optimalisasi juga menuntut penerapan konservasi tanah dan efisiensi penggunaan air secara sinergis. Penggunaan mulsa organik, penataan ulang jarak tanam, serta amandemen organik mampu menekan evaporasi dan meningkatkan water-use efficiency (WUE) (Keteku et al., 2024). Teknik ini tidak hanya memperbaiki kondisi fisik tanah, tetapi juga meningkatkan retensi air dan aktivitas mikroorganisme, yang merupakan komponen penting dalam sistem pertanian berbasis agroekologi. Pendekatan berbasis lokasi (*site-specific management*) menjadi syarat utama bagi keberhasilan diversifikasi. Penelitian Suswatiningsih & Anshori (2023) menemukan bahwa di wilayah Gunungkidul, kombinasi teknologi tanam spesifik, sistem irigasi mikro, dan pengaturan kalender tanam yang tepat mampu memperkuat performa kedelai di ekosistem kering. Hal ini menunjukkan optimalisasi tidak dapat dilakukan secara generik, melainkan harus mempertimbangkan kondisi pedoklimatik, topografi, dan ketersediaan air lokal.

Pemerintah dan organisasi non-pemerintah (NGO) bisa berperan besar dalam memfasilitasi penyediaan bahan organik bagi petani, misalnya dengan mendukung proses komposting yang dilakukan secara komunitas. Penting juga untuk memberikan subsidi alat konservasi tanah agar para petani, khususnya yang berpenghasilan kecil, terbantu dalam mengadopsi teknologi ramah lingkungan ini tanpa beban biaya yang berat. Selain itu, program pelatihan tentang desain sistem rotasi dan tumpangsari berbasis prinsip agroekologi harus diadakan secara berkala supaya petani mendapatkan pengetahuan yang memadai dan bisa menerapkannya secara efektif. Dengan dukungan seperti ini, penerapan teknik konservasi dan diversifikasi tanaman dengan amandemen organik di lahan kering dapat berjalan tanpa menambah beban ekonomi, sekaligus meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian (Paramesh et al., 2023).

Kelembagaan dan dukungan kebijakan publik menjadi fondasi bagi keberhasilan implementasi keberlanjutan sistem pertanian di lahan kering. Rejekiningrum et al. (2022) menekankan pentingnya regulasi yang mendukung efisiensi pemanfaatan sumber daya air, distribusi benih unggul, dan insentif bagi petani untuk menerapkan praktik konservasi. Tanpa dukungan kelembagaan, transfer teknologi dan adopsi inovasi akan menghadapi hambatan struktural yang signifikan di tingkat akar rumput. Optimalisasi diversifikasi tanaman harus disertai dengan sistem pemantauan jangka panjang berbasis indikator biofisik dan sosial-ekonomi. Evaluasi produktivitas, efisiensi air, kandungan bahan organik, serta pendapatan petani perlu dilakukan secara berkelanjutan untuk memastikan perbaikan sistem secara adaptif. Pendekatan ilmiah berbasis data longitudinal memungkinkan pembentukan model pertanian lahan kering yang resilien, adaptif terhadap perubahan iklim, dan sejalan dengan prinsip agroekologi berkelanjutan.

## KESIMPULAN

Pendekatan integrasi rotasi dan tumpangsari dengan amandemen organik diwujudkan dengan sistem pertanian lahan kering yang bertujuan mengoptimalkan efisiensi penggunaan hara dan air. Sistem ini memperkuat produktivitas tanaman dan kualitas lahan melalui peningkatan kandungan bahan organik serta perbaikan struktur dan siklus nutrisi tanah. Kombinasi ini bekerja dengan meningkatkan kemampuan tanah untuk menggunakan nutrisi secara efisien, misalnya dengan bantuan tanaman jenis kacang-kacangan yang menyumbang nitrogen, sekaligus meningkatkan daya serap dan penyimpanan air di dalam tanah. Dengan pola rotasi dan tumpangsari, persaingan antar tanaman dapat dikurangi sehingga pemanfaatan hara dan air menjadi lebih optimal. Amandemen organik memberikan manfaat dalam menjaga kestabilan tanah dan memperpanjang masa ketersediaan air bagi tanaman. Secara keseluruhan, integrasi ini menjadi strategi utama untuk mencapai keberlanjutan pertanian lahan kering dengan peningkatan efisiensi sumber daya, hasil produksi yang lebih baik dalam cekaman kekeringan, dan mengurangi ketergantungan pada pestisida sintetik, sehingga menjamin keberlanjutan pertanian lahan kering dalam jangka panjang.

## REKOMENDASI

Rekomendasi penelitian lanjutan perlu melakukan percobaan jangka panjang minimal lima tahun di beberapa agroekozona dan tipe tanah (berpasir, lempung, dan dangkal berbatu) untuk menilai perubahan stok karbon organik tanah, fraksi karbon labil dan resisten, dinamika nitrogen, serta perubahan kapasitas menahan air dan kapasitas tukar kation. Indikator tambahan mencakup erosi, infiltrasi, efisiensi penggunaan air, efisiensi penggunaan nitrogen, dan emisi gas rumah kaca. Optimalkan rancangan rotasi dan tumpangsari berbasis kalender tanam dan kebutuhan air pada fase kritis, termasuk tanam selang, penataan jarak tanam, dan tanaman penutup, agar kompetisi air berkurang dan produktivitas per satuan lahan meningkat. Uji kombinasi amandemen organik yang realistik secara lokal seperti kompos komunitas, pupuk kandang, pupuk hijau, dan biochar, dengan variasi dosis, waktu aplikasi, metode penempatan, serta mutu bahan (rasio karbon nitrogen, kematangan kompos, dan kontaminan). Integrasikan inokulan hayati serta praktik konservasi seperti mulsa dan olah tanah minimum untuk menguji efek sinergi pada mikroba rhizosfer, kesehatan tanah, dan pengendalian hama alami. Kelima, teliti faktor sosial ekonomi adopsi melalui pendekatan partisipatif, mencakup akses benih adaptif, kebutuhan tenaga kerja, risiko pasar komoditas sela, serta efektivitas insentif kebijakan. Terakhir, bangun model keputusan spesifik lokasi berbasis data iklim, tanah, dan biaya manfaat yang mudah digunakan penyuluh dan petani. Penggunaan sensor kelembapan, citra satelit, dan pencatatan usahatani sederhana dapat memperkaya data longitudinal. Validasi hasil perlu dilakukan pada skala petani melalui demonstrasi plot dan analisis risiko, sehingga rekomendasi teknis benar benar layak, adaptif, praktis, dan terjangkau.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A., Naveed, M., Khan, K. S., & Ashraf, M. (2024). *The Efficiency of Organic Amendments on Maize Productivity, Soil Properties and Active Fractions of Soil*

- Carbon in Organic-Matter De fi cient Soil.* 14(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/sjss.2024.12814>
- Abshiba, K., Sharma, V. K., Kumar, P., Syam, S., Barnwal, P. P., & Kumar, S. (2025). *A comprehensive review of soil quality indicators under diverse land uses in rainfed areas.* <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00109-5>
- Amalina, A. D., Yuliyanti, P. D., Putra, E. R., Azizah, L. (2024). *Peran Biochar Dalam Meningkatkan Kesuburan Tanah Dan Retensi Air.* 2(2). <https://doi.org/10.3766/hibrida.v1i2.3753>
- Ankomah, G., Amissah, S., Hollifield, S., Habteselassie, M. Y., Franklin, D. H., Snider, J. L., Kemerait, R. C., Roberts, P. M., & Sintim, H. Y. (2024). *Integrating cover crops and organic amendments to mitigate the limitations of tillage on soil health and cotton productivity.* February, 2615–2629. <https://doi.org/10.1002/agj2.21649>
- Bowles, T. M., Mooshammer, M., Socolar, Y., Calderón, F., Cavigelli, M. A., Culman, S. W., Deen, W., Drury, C. F., Garcia y Garcia, A., Gaudin, A. C. M., Harkcom, W. S., Lehman, R. M., Osborne, S. L., Robertson, G. P., Salerno, J., Schmer, M. R., Strock, J., & Grandy, A. S. (2020). Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America. *One Earth,* 2(3), 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>
- Choudhary, S., Rajpoot, S. K., Tripathi, A., & Choudhary, M. (2025). Diversified cropping systems for improving the crop productivity and soil health of dryland ecosystem. *Land Degradation & Development.* <https://doi.org/10.1002/ldr.70140>
- Dewi, T. N., Sebayang, H. T., & Suminarti, E. (2017). *Upaya Efisiensi Pemanfaatan Lahan Melalui Sistem Tanam Tumpangsari Sorgum Dengan Kacang-Kacangan Di Lahan Kering Improvement Of Land Use Efficiency Through Intercropping System Among Sorghum And Legumes In Dry Land.* 5(8), 1356–1366
- Dittmer, K. M., Rose, S., Snapp, S. S., Kebede, Y., Brickman, S., Shelton, S., Egler, C., Stier, M., & Wollenberg, E. (2023). Agroecology Can Promote Climate Change Adaptation Outcomes Without Compromising Yield In Smallholder Systems. *Environmental Management,* 72(2), 333–342. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01816-x>
- Huss, C. P., Holmes, K. D., & Blubaugh, C. K. (2022). Benefits and Risks of Intercropping for Crop Resilience and Pest Management. *Journal of Economic Entomology,* 115(5), 1350–1362. <https://doi.org/10.1093/jee/toac045>
- Keteku, A. K., Yeboah, P. A., Yeboah, S., Dormatey, R., Agyeman, K., Brempong, M. B., Ghanney, P., Poku, S. A., Danquah, E. O., Frimpong, F., Addy, S., Bosompem, F., & Aggrey, H. (2024). Plant Nutrition in Relation to Water-use Efficiency in Crop Production: A review. *Agrica,* 17(1), 67–95. <https://doi.org/10.37478/agr.v17i1.3547>
- Li, R., He, Z., He, P., Yang, R., Ma, D., Li, Y., Xiang, Y., Sun, W., Zhu, X., & Zhang, Z. (2025). Crop diversification improves productivity and soil health by regulating fungal diversity. *Soil and Tillage Research,* 252, 106628. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106628>
- Mariyanto, J., Muda, A., & Scholar, G. (2025). *Krisis Global Dan Implikasinya Bagi Pertanian Indonesia : Perubahan Iklim , Konflik Geopolitik , Dan Spekulasi Pasar.* 2(1), 22–43
- Mihrete, T. B., & Mihretu, F. B. (2025). Crop Diversification for Ensuring Sustainable Agriculture, Risk Management and Food Security. *Global Challenges,* 9(2), 1–13. <https://doi.org/10.1002/gch2.202400267>
- Moreira, B., Gonçalves, A., Pinto, L., Prieto, M. A., Carocho, M., Caleja, C., & Barros, L. (2024). Intercropping Systems: An Opportunity for Environment Conservation within Nut Production. *Agriculture (Switzerland),* 14(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture14071149>
- Natasha, R., Lanoe, O., Hadiwijoyo, S. S., Seba, R. O. C., Kristen, U., & Wacana, S. (2025). *Tantangan dan Peluang Indonesia dalam Association of Southeast Asian Nations ( ASEAN ) untuk Menghadapi Ketahanan Pangan Pasca Pandemi.* 17(3), 257–266
- Nur, U., Marliah, A., & Ichsan, C. N. (2023). *Pengaruh Amandemen Tanah dan Varietas Terhadap Aktivitas Aantioksidan Tanaman Padi (*Oryza sativa L.*) Pada Kondisi Cekaman Salinitas.* 8, 36–44

- Nurmasasinta, U., Astiko, W., & Listiana, B. E. (2022). *Konsentrasi Hara N , P dan Hasil Panen pada Tumpangsari Jagung- Kedelai yang Ditambahkan Mikoriza dan Sumber Nutrisi di Lahan Kering Lombok Utara.* 1(3), 233–242. <https://doi.org/10.29303/jima.v1i3.1460>
- Paramesh, V., Kumar, R. M., Rajanna, G. A., Gowda, S., Nath, A. J., Madival, Y., Jinger, D., Bhat, S., & Toraskar, S. (2023). *Integrated nutrient management for improving crop yields , soil properties , and reducing greenhouse gas emissions.* June, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1173258>
- Rejekiningrum, P., Apriyana, Y., Sutardi, Estiningtyas, W., Sosiawan, H., Susilawati, H. L., Hervani, A., & Alifia, A. D. (2022). Optimising Water Management in Drylands to Increase Crop Productivity and Anticipate Climate Change in Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/su141811672>
- Sharma, G., Shrestha, S., Kunwar, S., & Tseng, T. M. (2021). Crop diversification for improved weed management: A review. *Agriculture (Switzerland)*, 11(5), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050461>
- Stubbs, L. R., Singh, S., Wysocki, D., Heineck, G. C., Neely, H. L., & Singh, S. (2025). Improving sustainability of inland Pacific Northwest dryland agriculture systems with pea-canola intercropping: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9(August). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1639908>
- Suswatiningsih, T. E., & Anshori, A. (2023). The Strategy of Soybean Development on Dryland Agroecosystem in Gunungkidul Regency, D.I. Yogyakarta, Indonesia. *AgriHealth: Journal of Agri- Food, Nutrition and Public Health*, 4(1), 70. <https://doi.org/10.20961/agrihealth.v4i1.70379>
- Syahruddin, K., Suwardi, S., Priyanto, S. B., Efendi, R., Herawati, H., Fattah, A., Rahman, R., Hasbi, H., Aminah, A., Fatmawati, F., Santoso, S. B., Bidhari, L. A., & Abid, M. (2023). Adaptation of several hybrid maize in West Nusa Tenggara drylands using modified plant spacing for optimal seed and biomass productions. *Kultivasi*, 22(3), 294–302. <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v22i3.48558>
- Toda, M., Walder, F., & Heijden, M. G. A. Van Der. (2023). *Organic management and soil health promote nutrient use efficiency.* June, 215–224. <https://doi.org/10.1002/sae2.12058>
- Viona, M., Katating, D. G., & Candra, M. (2025). *Ekonomi Politik Ketahanan Pangan di Indonesia : Peran Negara Dalam Menghadapi Krisis Pangan.* 02(June), 502–508
- Williams, A., Birt, H. W. G., Raghavendra, A., & Dennis, P. G. (2023). Cropping System Diversification Influences Soil Microbial Diversity in Subtropical Dryland Farming Systems. *Microbial Ecology*, 85(4), 1473–1484. <https://doi.org/10.1007/s00248-022-02074-w>
- Yang, X., Xiong, J., Du, T., Ju, X., Gan, Y., Li, S., Xia, L., Shen, Y., Pacenka, S., Steenhuis, T. S., Siddique, K. H. M., Kang, S., & Butterbach-Bahl, K. (2024). Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>
- Zhao, Y., Chen, Y., Dai, H., Cui, J., Wang, L., & Sui, P. (2021). *Effects of Organic Amendments on the Improvement of Soil Nutrients and Crop Yield in Sandy Soils during a 4-Year Field Experiment in Huang-Huai-Hai Plain, Northern China.* <https://doi.org/10.3390/agronomy11010157>