
BIOFARM
Jurnal Ilmiah Pertanian
ISSN Print: 0216-5430; ISSN Online: 2301-6442
Vol. 22, No. 2, Oktober 2026

Peran Sistem Tumpangsari dalam Mendukung *Climate-Smart Agriculture*: Suatu Tinjauan Sistematis terhadap Produktivitas, Efisiensi Penggunaan Sumber Daya, dan Ketahanan Agroekosistem

The Role of Intercropping Systems in Supporting Climate-Smart Agriculture: A Systematic Review of Productivity, Resource Use Efficiency, and Agroecosystem Resilience

Muhammad Yudhistira A.[1], Melia Hasna S.[1], Tri Setia Rini[1], Purwanto*[1]
[1]Program Studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman
*Korespondensi Penulis: purwanto0401@unsoed.ac.id

ABSTRAK
Perubahan iklim global dan keterbatasan luas lahan pertanian menjadi tantangan serius bagi ketahanan pangan global dan nasional. Sistem pertanian *Climate-Smart Agriculture* (CSA) hadir sebagai solusi strategis untuk meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan, memperkuat kapasitas adaptasi, sekaligus memitigasi emisi gas rumah kaca (GRK). Artikel ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai peran sistem tumpangsari (*intercropping*) sebagai bentuk nyata implementasi prinsip-prinsip CSA melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Hasil sintesis menunjukkan bahwa tumpangsari secara konsisten mampu menaikkan produktivitas lahan dengan nilai *Land Equivalent Ratio* (LER) > 1 dan peningkatan hasil total hingga 28% dibandingkan monokultur. Keunggulan ekologis ini didukung oleh prinsip komplementaritas ruang-waktu bawah dan atas permukaan, efisiensi penggunaan air (WUE) hingga 20%, penghematan pupuk nitrogen sebesar 31%, serta kemampuan menekan kerusakan akibat penyakit tular tanah hingga 55%. Dalam konteks mitigasi, tumpangsari berbasis legum efektif mereduksi emisi gas N_2O antara 5,2% hingga 14,5% serta meningkatkan cadangan karbon organik tanah secara stabil melalui proses *bio-littering*. Kendati memiliki prospek cerah yang kini berkonvergensi dengan pertanian presisi, *digital farming*, dan prinsip regeneratif, adopsi di tingkat petani masih terhambat oleh kompleksitas manajemen agronomis, kompetisi antar-tanaman yang keliru, serta tingginya kebutuhan tenaga kerja manual. Lebih lanjut, penelitian di Indonesia masih menghadapi tantangan berupa terbatasnya studi longitudinal (jangka panjang), minimnya database agroklimatologi spesifik lahan tropis, dan tidak tuntasnya kajian emisi GRK riil di lapangan. Oleh karena itu, transformasi kebijakan riset multi-tahun dan introduksi mekanisasi mikro berbasis teknologi cerdas menjadi kunci optimalisasi tumpangsari masa depan.

Kata Kunci: *Climate-Smart Agriculture*, Tumpangsari, Lahan Tropis, Emisi Gas Rumah Kaca, Pertanian Presisi.

ABSTRACT
Global climate change and limited agricultural land area pose serious challenges to global and national food security. The Climate-Smart Agriculture (CSA) system presents a strategic solution to increase productivity sustainably, strengthen adaptive capacity, and mitigate greenhouse gas (GHG) emissions. This article aims to synthesize scientific evidence on the role of intercropping systems as a concrete form of implementing CSA principles through a Systematic Literature Review (SLR) approach. The synthesis results show that intercropping is consistently able to increase land productivity with a Land Equivalent Ratio (LER) value of > 1 and an increase in total yield of up to 28% compared to monoculture. This ecological advantage is supported by the principle of belowground and aboveground space-time complementarity, water use efficiency (WUE) of up to 20%, nitrogen fertilizer savings of 31%, and the ability to suppress damage from soil-borne diseases by up to 55%. In the context of mitigation, legume-based intercropping is effective in reducing N2O gas emissions by between 5.2% and 14.5% and increasing soil organic carbon reserves stably through the bio-littering process. Despite its promising prospects, which are now converging with precision agriculture, digital farming, and regenerative principles, adoption at the farmer level remains hampered by the complexity of agronomic management, erroneous inter-crop competition, and high manual labor requirements. Furthermore, research in Indonesia still faces challenges such as limited longitudinal (long-term) studies, a lack of agroclimatology databases specific to tropical lands, and incomplete studies of actual GHG emissions in the field. Therefore, a multi-year research policy transformation and the introduction of smart technology-based micro-mechanization are key to optimizing intercropping in the future.

Keyword: Climate-Smart Agriculture, Intercropping, Tropical Lands, Greenhouse Gas Emissions, Precision Agriculture.

PENDAHULUAN

Proyeksi Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) menunjukkan bahwa jumlah penduduk dunia akan mencapai 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019). Peningkatan kebutuhan pangan di tengah keterbatasan lahan pertanian menuntut sistem produksi yang mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya sekaligus mempertahankan produktivitas secara berkelanjutan (Ayaz *et al*., 2019). Di sisi lain, perubahan iklim semakin memperbesar tantangan sektor pertanian melalui peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, dan meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem yang berdampak pada stabilitas produksi pangan (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022).

Di Indonesia, dampak perubahan iklim terlihat dari terganggunya kalender tanam, meningkatnya serangan organisme pengganggu tanaman, serta menurunnya produktivitas tanaman pangan akibat fluktuasi curah hujan dan peningkatan suhu udara (BMKG, 2023). Selain itu, kejadian banjir dan kekeringan setiap tahun menimbulkan kerugian yang besar bagi sektor pertanian sehingga diperlukan sistem budidaya yang tidak hanya produktif, tetapi juga adaptif dan berkelanjutan (Kementan, 2022).

Salah satu pendekatan yang dikembangkan untuk menjawab tantangan tersebut adalah *Climate-Smart Agriculture* (CSA), yang diperkenalkan oleh Food and Agriculture Organization (FAO) sebagai strategi pertanian yang mengintegrasikan tiga tujuan utama, yaitu meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan, memperkuat kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim, dan mengurangi emisi gas rumah kaca (FAO, 2013). Namun, implementasi CSA masih menghadapi kendala karena sebagian besar sistem budidaya masih didominasi oleh praktik monokultur yang cenderung menurunkan kesuburan tanah, mengurangi keanekaragaman hayati, meningkatkan ketergantungan terhadap pupuk dan pestisida sintetis, serta mempercepat degradasi lingkungan (Belete & Yadete, 2023).

Sebagai alternatif, sistem polikultur mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan ruang dan sumber daya melalui penanaman lebih dari satu jenis tanaman pada lahan yang sama sehingga mendukung keberlanjutan agroekosistem (Mohd Ropi *et al*., 2020). Praktik ini juga berkontribusi terhadap peningkatan kualitas tanah dan keseimbangan ekologi melalui pemanfaatan keragaman tanaman (Angon *et al*., 2023). Di antara berbagai bentuk polikultur, tumpangsari (intercropping) merupakan sistem yang paling banyak diterapkan karena mampu mengoptimalkan interaksi antarspesies tanaman dan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya.

Tumpangsari diakui sebagai salah satu praktik *Climate-Smart Agriculture* karena mampu mengintegrasikan peningkatan produktivitas, adaptasi terhadap perubahan iklim, dan mitigasi emisi gas rumah kaca dalam satu sistem budidaya (Zheng *et al*., 2024). Sistem ini diterapkan melalui kombinasi dua atau lebih jenis tanaman yang meningkatkan efisiensi pemanfaatan cahaya, air, ruang tumbuh, dan unsur hara dibandingkan monokultur (Weih *et al*., 2022). Efisiensi tersebut berdampak pada peningkatan hasil, diversifikasi produksi, dan stabilitas pendapatan petani yang penting bagi ketahanan pangan (Sahoo *et al*., 2024). Selain itu, tumpangsari mampu meningkatkan biodiversitas agroekosistem, memperbaiki kualitas tanah, mengurangi risiko kegagalan panen akibat cekaman lingkungan (Rosa-Schleich *et al*., 2020), serta menekan penggunaan input sintetis dan meningkatkan akumulasi karbon organik tanah sehingga mendukung mitigasi perubahan iklim (Weih *et al*., 2022). Dengan demikian, tumpangsari berpotensi menjadi strategi intensifikasi pertanian berkelanjutan yang memperkuat resiliensi sistem produksi pada berbagai kondisi agroekosistem (Zheng *et al*., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, artikel ini bertujuan mensintesis bukti ilmiah mengenai peran sistem tumpangsari dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi penggunaan sumber daya, adaptasi terhadap perubahan iklim, serta mitigasi dampak lingkungan dalam kerangka *Climate-Smart Agriculture.* Sintesis ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah

yang lebih komprehensif bagi pengembangan strategi pertanian yang produktif, tangguh, dan berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini merupakan studi berbasis tinjauan pustaka yang bertujuan untuk menganalisis peran sistem tumpangsari dalam mendukung konsep *Climate-Smart Agriculture* (CSA). Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kualitatif dengan metode *Systematic Literature Review* (SLR), yaitu metode yang dilakukan secara sistematis, terstruktur, dan komprehensif untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, serta mensintesis hasil-hasil penelitian yang relevan dengan topik kajian. Proses SLR dilaksanakan melalui beberapa tahapan, yaitu: (1) merumuskan fokus kajian mengenai kontribusi sistem tumpangsari terhadap peningkatan produktivitas, efisiensi penggunaan sumber daya, adaptasi terhadap perubahan iklim, dan mitigasi dampak lingkungan; (2) melakukan penelusuran literatur menggunakan kata kunci *intercropping*, *cropping system*, *climate-smart agriculture*, *climate resilience*, *resource use efficiency*, dan *sustainable agriculture* pada basis data akademik seperti Google Scholar, Scopus, dan ScienceDirect; (3) menyeleksi artikel berdasarkan kriteria inklusi berupa artikel penelitian asli yang dipublikasikan pada jurnal ilmiah bereputasi dalam rentang tahun 2020–2026, tersedia dalam bentuk *full text*, serta memiliki relevansi dengan topik penelitian; (4) melakukan ekstraksi dan analisis data menggunakan pendekatan sintesis tematik dengan mengelompokkan hasil penelitian ke dalam aspek produktivitas, efisiensi penggunaan sumber daya, adaptasi terhadap perubahan iklim, mitigasi emisi, serta mekanisme ekologis yang mendukung sistem tumpangsari; dan (5) menyusun sintesis secara objektif berdasarkan temuan-temuan ilmiah yang kredibel untuk menghasilkan pemahaman yang komprehensif mengenai potensi sistem tumpangsari sebagai strategi pertanian cerdas iklim. Pendekatan tersebut diharapkan mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan penelitian, mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan, serta merumuskan arah pengembangan sistem tumpangsari dalam mendukung pertanian yang produktif, tangguh, dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa sistem tumpangsari (*intercropping*) secara konsisten memberikan kontribusi positif terhadap implementasi *Climate-Smart Agriculture* (CSA). Berdasarkan hasil telaah terhadap berbagai penelitian yang memenuhi kriteria inklusi, diperoleh bukti empiris bahwa tumpangsari mampu mendukung tiga pilar utama CSA, yaitu meningkatkan produktivitas pertanian, memperkuat kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim, serta berkontribusi dalam mitigasi emisi gas rumah kaca melalui peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya dan perbaikan kualitas agroekosistem. Ringkasan hasil sintesis penelitian yang menjadi dasar pembahasan pada artikel ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sintesis hasil penelitian mengenai kontribusi sistem tumpangsari terhadap tiga pilar *Climate-Smart Agriculture* (CSA).

Peneliti	Sistem Tumpangsari	Temuan Utama	Pilar CSA
Li *et al*. (2020)	Berbagai sistem *intercropping*	Rata-rata LER 1,16-1,29 menunjukkan efisiensi penggunaan lahan lebih tinggi dibanding monokultur.	Produktivitas
Feng *et al*. (2021)	Jagung-kacang tanah	LER rata-rata 1,31 sehingga produktivitas lahan meningkat.	Produktivitas
Li *et al*. (2023)	Meta-analisis 226 percobaan	Total hasil panen meningkat sekitar 28% dibanding monokultur (NER 1,28).	Produktivitas
Fan *et al*. (2020)	Jagung-kedelai	Serapan N meningkat 26,4-51,4%; P meningkat 37-57%; K meningkat 16,9-40,9%.	Efisiensi sumber daya

Peneliti	Sistem Tumpangsari	Temuan Utama	Pilar CSA
Liu *et al*. (2024)	Jagung-kedelai	Penghematan pupuk nitrogen sekitar 31% tanpa menurunkan hasil.	Mitigasi
Dai *et al*. (2023)	Apel-kedelai	Hasil meningkat 71,1% melalui optimasi penggunaan air.	Adaptasi
Wang *et al*. (2024)	Wolfberry-alfalfa	Evaporasi tanah turun 32%; transpirasi meningkat 29%.	Adaptasi
Choukri *et al*. (2025)	Berbagai serealia-legum	Meningkatkan toleransi terhadap kekeringan, salinitas, dan efisiensi penyerapan hara.	Adaptasi
Chadfield *et al*. (2022)	Berbagai sistem	Penyakit tular tanah turun hingga 55%; nematoda turun 40%.	Adaptasi
Yu *et al*. (2025)	Jagung-kentang	Emisi N_2O turun 5,2–14,5%.	Mitigasi
Jensen *et al*. (2020)	Serealia-legum	Mengurangi kebutuhan pupuk N sintetis melalui fiksasi biologis.	Mitigasi
Akchaya *et al*. (2025)	Legum *intercropping*	Meningkatkan karbon tanah, efisiensi sumber daya, dan jasa ekosistem.	Mitigasi & Adaptasi

Pembahasan

Sistem Tumpangsari Meningkatkan Produktivitas Pertanian

Pada Tabel 1 ditampilkan berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa sistem tumpangsari (*intercropping*) mampu meningkatkan produktivitas lahan dibandingkan sistem monokultur. Peningkatan tersebut umumnya ditunjukkan oleh nilai *Land Equivalent Ratio* (LER) yang lebih besar dari satu, yang mengindikasikan efisiensi penggunaan lahan yang lebih tinggi. Meta-analisis global oleh Li *et al*. (2020) melaporkan nilai LER sebesar 1,29 ± 0,02 pada sistem berbasis jagung dan 1,16 ± 0,02 pada sistem tanpa jagung. Feng *et al*. (2021) juga memperoleh nilai LER rata-rata 1,31 pada sistem tumpangsari jagung–kacang tanah, sedangkan Li *et al*. (2023) melaporkan peningkatan total hasil panen sekitar 28% berdasarkan analisis terhadap 226 percobaan lapangan.

Peningkatan produktivitas tersebut didukung oleh efisiensi pemanfaatan cahaya melalui stratifikasi tajuk dan pembagian ruang tumbuh yang bersifat komplementer. Duan *et al*. (2026) menunjukkan bahwa penggunaan jagung berkanopi kompak meningkatkan transmitansi cahaya, penerimaan PAR, dan laju fotosintesis kedelai. Govindaraj *et al*. (2023) juga melaporkan peningkatan *Radiation Use Efficiency* (RUE) pada sistem jagung-kacang hijau, sedangkan Li *et al*. (2026) menunjukkan bahwa efisiensi pemanfaatan radiasi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas tumpangsari.

Selain cahaya, komplementaritas sistem perakaran meningkatkan efisiensi penggunaan air sehingga kompetisi antartanaman dapat dikurangi. Yin *et al*. (2020) melaporkan bahwa sistem tumpangsari mampu meningkatkan *Water Use Efficiency* (WUE) melalui pemanfaatan air yang lebih efisien. Dai *et al*. (2023) menunjukkan bahwa optimasi distribusi akar pada sistem apel-kedelai meningkatkan hasil panen, sedangkan Wang *et al*. (2024) melaporkan penurunan evaporasi tanah dan peningkatan transpirasi dibandingkan sistem monokultur.

Produktivitas tumpangsari juga didukung oleh efisiensi penggunaan unsur hara melalui komplementaritas penyerapan hara dan fiksasi nitrogen biologis oleh tanaman legum. Fan *et al*. (2020) melaporkan peningkatan serapan nitrogen, fosfor, dan kalium pada sistem jagung-kedelai. Zhao *et al*. (2024) menunjukkan bahwa keberadaan legum meningkatkan serapan nitrogen melalui fiksasi biologis, sedangkan Liu *et al*. (2024) melaporkan bahwa sistem jagung-kedelai mampu menghemat penggunaan pupuk nitrogen tanpa menurunkan hasil panen.

Sistem Tumpangsari sebagai Strategi Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim

Hasil sintesis penelitian pada Tabel 1 menunjukkan sistem tumpangsari (*intercropping*) merupakan salah satu praktik *Climate-Smart Agriculture* (CSA) yang mampu meningkatkan kemampuan adaptasi tanaman terhadap berbagai cekaman akibat perubahan

iklim, seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan salinitas (Begna & Wakweya, 2025). Keberadaan lebih dari satu spesies tanaman pada lahan yang sama menciptakan mikroklimat yang lebih stabil melalui penurunan suhu tanah, peningkatan kelembapan kanopi, serta efisiensi penggunaan air dan unsur hara yang lebih baik dibandingkan sistem monokultur. Selain itu, perbedaan pola perakaran dan kebutuhan sumber daya memungkinkan pemanfaatan air yang lebih efisien sehingga kehilangan air akibat evaporasi dapat ditekan dan kelembapan tanah tetap terjaga pada kondisi terbatas air (Choukri *et al*., 2025).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem tumpangsari mampu mempertahankan bahkan meningkatkan produktivitas pada kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Adam *et al*. (2025) melaporkan peningkatan efisiensi penggunaan lahan hingga 78% pada sistem tanaman umbi-umbian berbasis legum. Karwani *et al*. (2025) juga menunjukkan bahwa tumpangsari jagung toleran kekeringan dengan buncis yang didukung pupuk kandang mampu meningkatkan hasil panen sekaligus ketahanan pangan rumah tangga. Pada tingkat fisiologis, tumpangsari meningkatkan efisiensi fotosintesis, aktivitas fotosistem II, konduktansi stomata, dan kapasitas asimilasi karbon dibandingkan monokultur (Hussain *et al*., 2023), serta meningkatkan aktivitas enzim antioksidan dan akumulasi osmolit yang berperan menjaga keseimbangan air sel selama cekaman kekeringan (Choukri *et al*., 2025).

Selain meningkatkan toleransi terhadap kekeringan, sistem tumpangsari juga mampu memodifikasi lingkungan tumbuh pada kondisi suhu tinggi maupun salinitas. Nyawade *et al*. (2019) melaporkan bahwa tumpangsari kentang-legum mampu menurunkan suhu tanah, meningkatkan kandungan air tanah, serta meningkatkan produktivitas air tanaman. Pada lahan salin, integrasi tanaman halofit dengan kedelai memperbaiki keseimbangan ion tanah dan meningkatkan kesuburan melalui kontribusi tanaman legum sehingga produktivitas tetap terjaga (Choukri *et al*., 2025).

Diversifikasi tanaman dalam sistem tumpangsari juga mengurangi risiko gagal panen akibat ketidakpastian iklim karena perbedaan tingkat toleransi antarspesies membuat hasil panen lebih stabil (Maitra *et al*., 2021). Rusinamhodzi *et al*. (2012) menunjukkan bahwa ketika jagung mengalami penurunan produksi akibat curah hujan yang tidak menentu, tanaman pendamping seperti kedelai atau buncis masih mampu menghasilkan panen. Kondisi tersebut memungkinkan kerugian pada satu komoditas dikompensasi oleh tanaman lainnya sehingga stabilitas produksi dan pendapatan petani tetap terjaga (Karwani *et al*., 2025). Dampak tersebut pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan pangan rumah tangga (Mihrete & Mihretu, 2025).

Keanekaragaman tanaman dalam sistem tumpangsari juga meningkatkan ketahanan terhadap hama dan penyakit melalui terbentuknya agroekosistem yang lebih heterogen (Mir *et al*., 2022). Mekanisme seperti *host dilution*, *barrier effect*, dan kamuflase visual maupun kimia mampu menekan penyebaran organisme pengganggu tanaman (Burgess *et al*., 2022). Chadfield *et al*. (2022) melaporkan bahwa sistem tumpangsari mampu menurunkan kerusakan akibat nematoda hingga 40% dan penyakit tular tanah hingga 55% dibandingkan monokultur. Selain itu, struktur kanopi yang lebih beragam menyediakan habitat bagi musuh alami sehingga pengendalian hayati menjadi lebih efektif (Huss *et al*., 2022). Dengan demikian, sistem tumpangsari mampu meningkatkan resiliensi agroekosistem melalui peningkatan toleransi terhadap cekaman abiotik, stabilitas produksi, serta perlindungan alami terhadap hama dan penyakit sebagai strategi adaptasi terhadap perubahan iklim (Sahoo *et al*., 2024).

Sistem Tumpangsari sebagai Strategi Mitigasi Perubahan Iklim

Hasil sintesis penelitian menunjukkan bahwa sistem tumpangsari (*intercropping*) berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan cadangan karbon tanah, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta penurunan ketergantungan terhadap input sintetis. Diversitas spesies meningkatkan biomassa akar dan akumulasi bahan organik tanah melalui proses *bio-littering* sehingga

memperbesar cadangan karbon organik yang stabil di dalam tanah (Huss *et al*., 2022). Peningkatan cadangan karbon tersebut memperkuat fungsi tanah sebagai penyerap karbon atmosfer sekaligus memperbaiki kualitas tanah (Burgess *et al*., 2022), sedangkan pengelolaan tumpangsari dalam jangka panjang mampu meningkatkan stabilitas agregat tanah sehingga karbon tersimpan lebih lama (Sahoo *et al*., 2024). Selain itu, sistem tumpangsari juga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya yang mendukung keberlanjutan agroekosistem (Akchaya *et al*., 2025).

Sistem tumpangsari juga mampu menekan emisi gas rumah kaca melalui peningkatan efisiensi penggunaan nitrogen. Yu *et al*. (2025) melaporkan bahwa sistem tumpangsari jagung-kentang menurunkan emisi N_2O sebesar 5,2-14,5% dibandingkan monokultur. Penurunan emisi tersebut terjadi karena pemanfaatan nitrogen yang lebih efisien sehingga kehilangan nitrogen melalui denitrifikasi dan volatilisasi dapat ditekan (Akchaya *et al*., 2025). Integrasi tanaman legum juga mengurangi kebutuhan pupuk nitrogen sintetis melalui fiksasi nitrogen biologis sehingga jejak karbon dari produksi pupuk kimia menjadi lebih rendah (Jensen *et al*., 2020).

Penerapan sistem tumpangsari turut mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal yang berpotensi mencemari lingkungan. Tanaman legum mampu menyediakan nitrogen secara alami sehingga kebutuhan pupuk sintetis dapat dikurangi (Akchaya *et al*., 2025). Keragaman vegetasi juga meningkatkan efektivitas pengendalian hayati sehingga penggunaan pestisida kimia dapat ditekan (Huss *et al*., 2022). Selain itu, sistem tumpangsari meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui peningkatan retensi air tanah, pengurangan evaporasi, serta mekanisme *bio-irrigation* (Maitra *et al*., 2021). Dengan demikian, sistem tumpangsari tidak hanya berperan dalam menekan emisi gas rumah kaca, tetapi juga mendukung efisiensi penggunaan pupuk, pestisida, dan air sehingga menjadi salah satu strategi mitigasi perubahan iklim yang sejalan dengan prinsip *Climate-Smart Agriculture* (Sahoo *et al*., 2024).

Mekanisme Ekologis dan Ekofisiologis yang Mendukung Sistem Tumpangsari

Keberhasilan sistem tumpangsari dalam mendukung *Climate-Smart Agriculture* (CSA) didasarkan pada mekanisme ekologis dan ekofisiologis yang memungkinkan berbagai spesies tanaman memanfaatkan sumber daya secara komplementer serta membentuk interaksi yang saling menguntungkan. Konsep tersebut berlandaskan teori relung ekologi (*ecological niche*), yaitu pemanfaatan sumber daya biotik dan abiotik oleh organisme di lingkungannya (Jeraldo *et al*., 2012). Relung ekologi dipengaruhi oleh adaptasi dan interaksi tanaman dengan lingkungan (Grinnell, 1917), sehingga diferensiasi relung secara spasial, temporal, dan fungsional memungkinkan tanaman memanfaatkan cahaya, air, dan unsur hara secara lebih efisien serta mengurangi kompetisi antarspesies (Malezieux *et al*., 2008). Perbedaan arsitektur tajuk, sistem perakaran, dan umur tanaman menciptakan pemanfaatan sumber daya yang saling melengkapi sehingga efisiensi sistem pertanaman meningkat (Margawati *et al*., 2016).

Selain prinsip komplementaritas, sistem tumpangsari didukung oleh mekanisme fasilitasi antartanaman yang meningkatkan efisiensi siklus hara dan fungsi rizosfer. Integrasi serealia dan legum memungkinkan terjadinya transfer nitrogen biologis melalui fiksasi simbiotik oleh bakteri *Rhizobium* sehingga mengurangi kompetisi nitrogen di dalam tanah (Wang *et al*., 2026). Transfer nitrogen tersebut diperkuat oleh jaringan mikoriza dan dekomposisi akar maupun bintil akar yang melepaskan nitrogen ke dalam tanah (Nurmasasinta *et al*., 2022). Selain itu, eksudat akar memodifikasi kondisi rizosfer sehingga meningkatkan ketersediaan fosfor, nitrogen, besi, dan seng melalui perubahan pH lokal serta pelepasan ligan organik (Wardani *et al*., 2025). Mekanisme tersebut meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk sekaligus mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca (Akchaya *et al*., 2025).

Penerapan tumpangsari juga meningkatkan keanekaragaman hayati agroekosistem melalui sinergi antara mikroorganisme tanah, penyerbuk, dan musuh alami hama. Diversifikasi tanaman memperkaya komunitas mikroba fungsional

serta meningkatkan aktivitas enzim tanah yang berperan dalam penyediaan unsur hara (Xiao *et al*., 2022). Keberadaan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) meningkatkan sintesis fitohormon dan membantu tanaman menghadapi cekaman lingkungan (Roy *et al*., 2026). Keragaman tanaman di atas permukaan tanah menyediakan sumber pakan yang berkelanjutan bagi penyerbuk dan musuh alami sehingga pengendalian hayati menjadi lebih efektif (Moreira *et al*., 2024; Allifah *et al*., 2013).

Interaksi tersebut pada akhirnya memperbaiki kesehatan tanah sebagai fondasi keberlanjutan sistem tumpangsari. Integrasi tanaman dengan sistem perakaran yang berbeda meningkatkan aktivitas mikrobioma rizosfer sehingga mempercepat pemulihan kualitas tanah dan meningkatkan kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim (Dohare *et al*., 2025). Keanekaragaman mikroba juga membentuk tanah yang lebih supresif terhadap patogen (Joshi *et al*., 2026), sedangkan aktivitas mikroba dan sistem perakaran multilapis memperbaiki struktur tanah, porositas, aerasi, kapasitas retensi air, serta efisiensi pemanfaatan unsur hara (Chen *et al*., 2024; Purohit *et al*., 2024). Dengan demikian, komplementaritas relung, fasilitasi antartanaman, peningkatan keanekaragaman hayati, dan perbaikan kesehatan tanah membentuk mekanisme yang saling terintegrasi dalam meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, stabilitas agroekosistem, serta produktivitas dan keberlanjutan pertanian sebagai landasan utama implementasi *Climate-Smart Agriculture*.

Tantangan dan Arah Pengembangan Sistem Tumpangsari

Penerapan sistem tumpangsari sebagai bagian dari *Climate-Smart Agriculture* (CSA) di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala teknis, ekologis, dan sosial-ekonomi. Meskipun CSA telah diperkenalkan sebagai strategi untuk meningkatkan produktivitas, ketahanan, dan mitigasi emisi gas rumah kaca (Purwanti *et al*., 2022), keberhasilan penerapannya sangat bergantung pada kapasitas adaptasi petani, penguasaan teknologi budidaya, kemampuan permodalan, serta keterampilan mengelola beberapa komoditas secara bersamaan (Mandra *et al*., 2025). Kurangnya pemahaman mengenai karakteristik tanaman dan kebutuhan sumber daya sering menyebabkan kompetisi cahaya, air, dan unsur hara yang menurunkan produktivitas (Kesuma *et al*., 2018). Selain itu, perbedaan waktu tanam dan panen meningkatkan kebutuhan tenaga kerja serta membatasi penggunaan mekanisasi sehingga biaya operasional tumpangsari relatif lebih tinggi dibandingkan sistem monokultur (Nugraheni & Tinaprilla, 2022).

Pengembangan sistem tumpangsari juga masih menghadapi kesenjangan penelitian. Sebagian besar penelitian di Indonesia hanya berlangsung selama satu hingga dua musim tanam sehingga belum mampu mengevaluasi manfaat jangka panjang terhadap indikator utama CSA (Wardani *et al*., 2025). Perubahan sifat fisik dan biologi tanah umumnya baru mencapai kondisi yang stabil setelah dikelola secara konsisten selama 5-10 tahun (Moreira *et al*., 2024). Selain itu, sebagian besar konsep tumpangsari masih mengacu pada model subtropis sehingga memerlukan penyesuaian dengan karakteristik agroekosistem tropis Indonesia (Arafah *et al*., 2024).

Meskipun demikian, prospek pengembangan tumpangsari tetap menjanjikan melalui integrasi teknologi modern dan pendekatan ekologi. Penerapan pertanian presisi, seperti sensor tanah, pemupukan spesifik lokasi, dan irigasi tetes, mampu meningkatkan efisiensi penggunaan input serta mengurangi kompetisi antar tanaman (Wahyudi *et al*., 2025). Pemanfaatan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) multispektral juga mendukung pemantauan kondisi tanaman secara lebih akurat (Muhammad *et al*., 2025). Selain itu, penerapan prinsip pertanian regeneratif berpotensi meningkatkan kesehatan tanah, keanekaragaman hayati, dan mengurangi ketergantungan terhadap input kimia sintetis (Evizal & Prasmatiwi, 2024).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil tinjauan sistematis terhadap seluruh literatur dan data yang tersedia, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

1. Validasi Pilar CSA: Sistem tumpangsari terbukti secara ilmiah memenuhi tiga pilar utama *Climate-Smart Agriculture* (CSA),

yaitu meningkatkan produktivitas lahan secara signifikan (efek kenaikan hasil rata-rata 28%), memperkuat resiliensi dan adaptasi tanaman terhadap cekaman abiotik (kekeringan, suhu ekstrem, salinitas), serta berfungsi sebagai agen mitigasi iklim lewat peningkatan sekuestrasi karbon tanah dan pemotongan emisi gas N_2O hingga 14,5%.

2. Mekanisme Ekofisiologis: Keunggulan sistem tumpangsari bersandar pada prinsip komplementaritas dan fasilitasi antar-tanaman (misalnya interaksi serealia-legum. Pemisahan relung spasial, waktu, dan fungsional terbukti meminimalkan kompetisi eksklusif dalam perebutan air, cahaya, dan unsur hara, sekaligus mengaktifkan agen hayati tanah dan memperbanyak musuh alami di atas permukaan.
3. Kendala Struktural Petani: Penerapan di tingkat petani lokal masih dibayangi oleh hambatan operasional dan finansial. Sifat tumpangsari yang padat karya memicu pembengkakan biaya upah buruh tani. Keterbatasan pengetahuan tentang arsitektur perakaran dan morfologi tajuk juga sering kali memicu kompetisi negatif yang berujung pada penurunan hasil panen.
4. Kesenjangan Riset Nasional: Terdapat kekosongan data yang masif di Indonesia akibat riset tumpangsari yang umumnya bersifat jangka pendek (1–2 musim) (p. 18). Hal ini mengakibatkan proyeksi jangka panjang terkait kestabilan sifat fisik-biologi tanah, fluktuasi kelembapan dan laju dekomposisi biomassa di lahan tropis, serta kalkulasi fluks emisi GRK yang tuntas menjadi sulit direkomendasikan secara presisi kepada petani.
5. Arah Prospek Masa Depan: Masa depan tumpangsari cerdas iklim bergantung pada konvergensi pertanian presisi dan modernisasi (p. 19). Penggunaan sensor tanah otomatis (*Variable Rate Application*), irigasi tetes pintar, pemantauan indeks vegetasi berbasis UAV/drone multispektoral, pemuliaan varietas toleran naungan, serta penyelarasan dengan prinsip pertanian regeneratif akan menjadi kunci utama untuk mereduksi kendala padat karya dan kerumitan manajemen lahan tumpangsari di wilayah tropis.

DAFTAR PUSTAKA

Adam, M. M., Giller, K. E., Rusinamhodzi, L., Rasche, F., Koomson, E., Marohn, C., & Cadisch, G. 2025. Enhancing the resilience of intercropping systems to changing moisture conditions in Africa through the integration of grain legumes: A meta-analysis. *Field Crops Research, 321*, 109663. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109663

Adnan dan M. M. Munauwar. 2023. Optimalisasi Produksi Kedelai Varietas Anjasmoro dengan Manipulasi Arah Baris dan Gulma. *Jurnal Agrium*. 20 (3): 250-257. https://doi.org/10.29103/agrium.v20i3.12661

Akchaya, K., Parasuraman, P., Pandian, K., Vijayakumar, S., Thirukumaran, K., Mustaffa, M. R. A. F., Rajpoot, S. K., & Choudhary, A. K. 2025. Boosting resource use efficiency, soil fertility, food security, ecosystem services, and climate resilience with legume intercropping: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 9*, 1527256. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1527256

Allifah A.N, B. Yanuwiadi, Z. P. Gama dan A. S. Leksono. 2013. Refugia Sebagai Mikrohabitat Untuk Meningkatkan Peran Musuh Alami Di Lahan Pertanian. Prosiding FMIPA Universitas Pattimura 2013 – ISBN: 978-602-97522-0-5.

Angon, P. B., Anjum, N., Akter, M. M., Kc, S., Suma, R. P., & Jannat, S. 2023. An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. Advances in Agriculture. *Hindawi Limited.* https://doi.org/10.1155/2023/8861216

Arafah N, V. Fitriani, L. Indriyani, S. Bana, dan L. D. Ahmaliun. 2024. Penerapan Climate Smart Agriculture Sebagai Upaya Adaptasi Perubahan Iklim di Desa Pudaria Jaya Kecamatan Moramo Kabupaten Konawe Selatan. 1 (2):61-64.

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. 2019. Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access, 7*, 129551–129583. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. 2023. *Laporan tahunan perubahan iklim*

Indonesia 2023. https://www.bmkg.go.id

Begna, T., & Wakweya, R. B. 2025. Climate-smart agriculture: Effect of climate change on food security and its mitigation strategies. *International Journal of Agronomy, 2025*, Article ID 9972955. https://doi.org/10.1155/ioa/9972955

Belete, T., & Yadete, E. 2023. Effect of mono cropping on soil health and fertility management for sustainable agriculture practices: A review. *Plant Sci*, *11*, 192-197.

Burgess, A. J., Cano, M. E. C., & Parkes, B. 2022. The deployment of intercropping and agroforestry as adaptation to climate change. *Crop and Environment, 1*(3), 145–160. https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.05.001

Chadfield, V. G. A., Hartley, S. E., & Redeker, K. R. 2022. Associational resistance through intercropping reduces yield losses to soil-borne pests and diseases. *New Phytologist, 235*(6), 2393–2405. https://doi.org/10.1111/nph.18302

Chen Q, Y. Song. Y. An, Y. Lu, and G. Zhong. 2024. Soil Microorganisms: Their Role in Enhancing Crop Nutrition and Health. 16 (12): 734. https://doi.org/10.3390/d16120734

Choukri, R., Maach, M., Rahhou, A., Faize, M., Skalli, A., Akodad, M., Moumen, A., & Baghour, M. 2025. Intercropping strategies for abiotic stress tolerance and nutrient acquisition. *Plant Science Today,* *12*(3), 1–11. https://doi.org/10.14719/pst.3976

Dai, Y., Wang, J., Wan, H., Kang, Y., Ma, Y., Qi, G., & Jia, Q. 2023. Effects of different micro-irrigation methods on water use and the economic benefits of an apple–soybean intercropping system in the Loess Plateau, China. *Agronomy***,** 13(4), 1143. https://doi.org/10.3390/agronomy13041143

Dohare K. S, M. P. Lahagu, dan P. N. K. Waruru. 2025. Peran Mikroorganisme Tanah dalam Meningkatkan Kesehatan Tanah dan Hasil Pertanian Organik. *Jurnal Ilmu Pertanian dan Teknologi dalam Ilmu Tanaman*. 2 (1): 166-178. https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.253

Duan, S., Du, B., Chen, W., Chen, S., Liao, Q., Shukla, M., & Du, T. 2026. Optimizing maize canopy structure to enhance resource use efficiency in maize–soybean intercropping systems. *Agricultural Water Management*, 325, 110161. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110161

Evizal R dan F. E. Prasmatiwi. 2024. Penerapan Pertanian Regeneratif pada Perkebunan Kopi. Jurnal Agrotropika. 23 (1):37-47.

Fan, Y., Chen, J., Cheng, Y., Raza, M. A., Wu, X., Wang, Z., Yong, T., Liu, W., Liu, J., Du, J., Shu, K., Yang, F., Wang, X., & Yang, W. 2020. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in maize–soybean intercropping under different row configurations. *Scientific Reports, 10*(1), 9502. https://doi.org/10.1038/s41598-020-66459-y

Feng, C., Stomph, T. J., Zhang, C., Li, H., Zhang, F., & van der Werf, W. 2021. *Maize/peanut intercropping increases land productivity: A meta-analysis*. *Field Crops Research*, 270, 108208. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108208

Food and Agriculture Organization. 2013. *Climate-Smart Agriculture sourcebook*. https://www.fao.org/climate-smart-agriculture

Govindaraj, T., Maragatham, N., Ramanathan, S. P., Geethalakshmi, V., & Kalarani, M. K. 2023. Light interception and radiation use efficiency (RUE) in maize (*Zea mays* L.) intercropping with greengram (*Vigna radiata* L.). *Journal of Applied and Natural Science*, 15(3), 1044–1050. https://doi.org/10.31018/jans.v15i3.4751

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

Hussain S, Wang J, Asad Naseer M, Saqib M, Siddiqui MH, Ihsan F, *et al*. 2023. Water stress memory in wheat/maize intercropping regulated photosynthetic and antioxidative responses under rainfed conditions. *Sci Rep.;*13:13688. https://doi.org/10.1038/s41598-023-40644-1

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Jensen, E. S., Carlsson, G., & Hauggaard-Nielsen, H. 2020. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development, 40*(1), 5. https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x

Joshi N, D. Jinger, S. Joshi, E. Joshi, and J.K. Sharma. 2026. Soil health management strategies for climateresilient agriculture. *Discover Soil.* 3 (39): 1-39. https://doi.org/10.1007/s44378-026-00194-0

Karwani, G. M., Meya, A. I., Teshale, M. A., & Philipo, M. 2025. Effects of *Climate-Smart Agriculture* technologies on maize-common bean intercrops growth and yield performances in smallholder farmer's fields in semi-arid areas, Tanzania. *Agricultural Sciences, 16*(8), 730–752. https://doi.org/10.4236/as.2025.168046

Kementerian Pertanian Republik Indonesia. 2022. *Strategi nasional adaptasi perubahan iklim di sektor pertanian*. https://www.pertanian.go.id

Kesuma A., N. Nurmauli, P.B. Timotiwu, dan H. Hamin. 2018. Efisiensi Pupuk Urea Dan Lahan Dalam Meningkatkan Hasil Jagung "DoubleRow" Pada Pola TanamTumpang Sari Dengan Kacang Tanah. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan.* 18 (3):153-158. http://dx.doi.org/10.25181/jppt.v18i3.66

Li, C., Hoffland, E., Kuyper, T. W., Yu, Y., Zhang, C., Li, H., Zhang, F., van der Werf, W., & Stomph, T. J. 2020. *Syndromes of production in intercropping impact yield gains*. *Nature Plants*, 6, 653–660. https://doi.org/10.1038/s41477-020-0680-9

Li, C., Stomph, T. J., Makowski, D., Li, H., Zhang, C., Zhang, F., & van der Werf, W. 2023. The productive performance of intercropping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 120(2), e2201886120. https://doi.org/10.1073/pnas.2201886120

Li, C., Stomph, T. J., Makowski, D., Li, H., Zhang, C., Zhang, F., & van der Werf, W. 2023. The productive performance of intercropping. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 120*(2), e2201886120. https://doi.org/10.1073/pnas.2201886120

Li, Runfu. Z. Niu. & H. Niu. 2026. Interspecific Nitrogen Transfer and Nutrient Exchange in Legume-Cereal Intercropping Systems: A Review. Reginoal Ecology and Management. 1(1):1-11. https://doi.org/10.53941/rem.2026.100004

Li, Z., Zhao, Z., Xu, X., Xu, J., Li, J., & Cai, H. 2026. Productivity and photosynthetic performance of maize–soybean intercropping under different water and nitrogen management strategies. *Agronomy*, 16(1), 98. https://doi.org/10.3390/agronomy16010098

Liu, X., Zhang, C., Li, L., Zhang, F., & Yu, Y. 2024. Nitrogen input strategies impact fertilizer nitrogen saving by intercropping: A global meta-analysis. *Field Crops Research, 317*, 109529. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109529

Maitra, S., Hossain, A., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., Gitari, H., Brahmachari, K., Shankar, T., Bhadra, P., Palai, J. B., Jena, J., Bhattacharya, U., Duvvada, S. K., Lalichetti, S., & Sairam, M. 2021. Intercropping—A low input agricultural strategy for food and environmental security. *Agronomy, 11*(2), 343. https://doi.org/10.3390/agronomy11020343

Mandra, M. A.S., Mithen, E, S. Sahabuddin. Penerapan Pertanian cerdas iklim: Peluang, tantangan dan strategi peningkatan kapasitas adaptasi petani pada daerah irigasi Saddang di Sulawesi Selatan. *Seminar Nasional Hasil Penelitian 2025 LP2M-Universitas Negeri Makassar* ISBN: 978-623-387-152-5.

Margawati, D.T. N. Herlina dan D. Hariyono. 2016. Pemanfaatan sumber daya yang berbeda pada sistem pertanaman tumpangsari pada tanaman cabai dan tanaman kubis. *Jurnal Produksi Tanaman.* 10 (10): 1-9. https://repository.ub.ac.id/id/eprint/131650/9/JURNAL.pdf

Mihrete, T. B., & Mihretu, F. B. 2025. Crop diversification for ensuring sustainable agriculture, risk management and food security. *Global Challenges, 9*(2), 2400267. https://doi.org/10.1002/gch2.202400267

Mir, M. S., Saxena, A., Kanth, R. H., Raja, W., Dar, K. A., Mahdi, S. S., Bhat, T. A., Naikoo, N. B., Nazir, A., Amin, Z., Mansoor, T., Zar Myint, M., Khan, M. R., Mohammad, I., & Mir, S. A. 2022. Role of intercropping in sustainable insect-pest management: A review. *International Journal of Environment and Climate Change, 12*(11), 3390–3403. https://doi.org/10.9734/IJECC/2022/v12i111390

Mohd Ropi, N. A., Noor, N. M., Ying, O. P., Nadri, M. H., Othman, N. Z., Kai, C. K., & Yeng, L. H. 2020. Effect of different types of fertilizer application on the soil fertility of oil palm reclamation soil under polyculture system. *Journal Of Agrobiotechnology,* 11(2), 1–11. https://doi.org/10.37231/jab.2020.11.2.187

Moreira B, A. Goncalvelves, L. Pinto, M.A. Prieto, M. Carocho, C. Caleja, and L. Barros. 2024. Intercropping Systems: An Opportunity for Environment Conservation within Nut Production. *Journal Agriculture.* 14: 2-24. https://doi.org/10.3390/agriculture14071149

Muhammad a, W. Iskandar, K. Munibah, dan B. Barus. 2025. Penggunaan Indeks Vegetasi Berbasis Citra Multispektral Droneuntuk Deteksi Kondisi Pertumbuhan Padi Sawah. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan.* 27 (2): 115-122. https://doi.org/10.29244/jitl.27.2.115-122

Nugraheni, S.S., dan N. Tinaprilla. 2022. Analisis Pendapatan Usaha Tani Tumpangsari Kentang di Kecamatan Pangalengan Kabupaten Bandung. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan.* 9 (2): 123-132. ISSN: 2355-6226

Nurmasasinta, U., Astiko, W., & Listiana, B. E. (2022). *Konsentrasi Hara N , P dan Hasil Nutrisi di Lahan Kering Lombok Utara. 1*(3), 233–242. https://doi.org/10.29303/jima.v1i3.1460

Nyawade, S. O., Karanja, N. N., Gachene, C. K. K., Gitari, H. I., Schulte-Geldermann, E., & Parker, M. L. 2019. Intercropping optimizes soil temperature and increases crop water productivity and radiation use efficiency of rainfed potato. *American Journal of Potato Research, 96*(5), 457–471. https://doi.org/10.1007/s12230-019-09737-4

Purohit H. J, P. Pandit, R, Pal, R. Warke, and G. M. Warke. 2024. Soil microbiome: An intrinsic driver for climate smart agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101433

Purwanti, T. S., Syafrial, Huang, R. & Saeri. (2022). What drives climate change adaptation practices in smallholder farmers? Evidence from potato farmers in Indonesia. *Atmosphere*, 13(1), 113. https://doi.org/10.3390/atmos13010113

Roy M, S. Dutta, and D. Mondal. 2026. Intercropping for Climate-Smart Agriculture: Mitigating Risks and Enhancing Resilience. NG Agriculture Insights. 2(2). https://doi.org/10.5281/zenodo.19314585

Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangara, J., & Giller, K. E. 2012. Maize–grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Research, 136*, 12–22. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.014

Sahoo, U., Malik, G. C., Maitra, S., Banerjee, M., Masina, S., Nath, S., & Suvadra, J. S. 2023. Intercropping system: a climate-smart approach for sustaining food security. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 1-7. https://10.7324/JABB.2024.170871

Sahoo, U., Malik, G. C., Maitra, S., Banerjee, M., Masina, S., Nath, S., & Suvadra, J. S. 2024. Intercropping system: A climate-smart approach for sustaining food security. *Journal of Applied Biology & Biotechnology, 12*(1), 1–7. http://doi.org/10.7324/JABB.2024.170871

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019. *World population prospects 2019: Highlights*. United Nations.

Wahyudi, A. I. Pradana, dan H. Permatasari. 2025. Implementasi Sistem Irigasi

Otomatis Berbasis IoT untuk Pertanian Greenhouse. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia.* 5(2): 435-446. https://doi.org/10.52436/1.jpti.656

Wardani A.A., L. E, Susilowti, Mulyati, dan Suwardji. 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

Weih, M., Mínguez, M. I., & Tavoletti, S. 2022. Intercropping systems for sustainable agriculture. *Agriculture*, *12*(2), 291. https://doi.org/10.3390/agriculture12020291

Xiao X, L. Han, H. Chen, J. Wang, Y. Zhang, and A. Hu. 2022. Intercropping enhances microbial community diversity and ecosystem functioning in maize fields. doi: 10.3389/fmicb.2022.1084452

Yin, W., Chai, Q., Guo, Y., Feng, F., Zhao, C., Yu, A., Hu, F., Fan, Z., & Coulter, J. A. 2020. Water utilization in intercropping: A review. *Agricultural Water Management*, 241, 106335. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335

Yu, W., Zhao, P., Li, C., Wang, D., Ming, C., Chen, L., Zhou, L., Zhu, Q., Tang, L., Zhou, Y., & Long, G. 2025. Intercropping achieves long-term dual goals of yield gains and soil N2O emission mitigation. *Resources, Environment and Sustainability, 20*, 100210. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2025.100210

Zheng, H., Ma, W., & He, Q. 2024. Climate-smart agricultural practices for enhanced farm productivity, income, resilience, and greenhouse gas mitigation: a comprehensive review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *29*(4), 28. https://doi.org/10.1007/s11027-024-10124-6