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

Pengembangan Sistem Pertanaman Adaptif Untuk Menghadapi Perubahan Iklim Di Indonesia: Sebuah Review Literatur

Development of Adaptive Cropping Systems to Address Climate Change in Indonesia: A Literature Review

Farras Naufal Tari[1], Ivo Adiprianto[1], Purwanto*[2]
[1]Program Studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman
[2]Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman
*Korespondensi Penulis: purwanto0401@unsoed.ac.id

ABSTRAK
Perubahan iklim menjadi tantangan utama dalam pembangunan pertanian global dan nasional. Peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, kejadian cuaca ekstrem, dan gangguan ketersediaan air telah memengaruhi produktivitas berbagai komoditas pertanian di Indonesia. Artikel ini bertujuan mengkaji pengembangan sistem pertanaman adaptif sebagai strategi menghadapi perubahan iklim serta perannya dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi sumber daya, dan resiliensi agroekosistem. Metode yang digunakan berupa review literatur naratif terarah melalui seleksi artikel nasional dan internasional dengan prinsip PRISMA. Hasil kajian menunjukkan bahwa penyesuaian kalender tanam, pengaturan pola tanam, diversifikasi dan rotasi tanaman, efisiensi penggunaan air dan hara, pemanfaatan informasi iklim, serta penerapan prinsip *Climate-smart agriculture* mampu menekan risiko gagal panen dan meningkatkan stabilitas produksi. Implementasi sistem pertanaman adaptif masih menghadapi kendala berupa keterbatasan akses informasi, kapasitas petani, pasar, modal, dan dukungan kelembagaan. Oleh karena itu, integrasi teknologi adaptif, pengetahuan lokal, penyuluhan, dan kebijakan spesifik lokasi diperlukan untuk mempercepat adopsi sistem pertanaman adaptif guna mendukung pertanian berkelanjutan di Indonesia.

Kata kunci**:** sistem pertanaman adaptif, perubahan iklim, kalender tanam, diversifikasi tanaman, resiliensi agroekosistem, pertanian berkelanjutan

ABSTRACT
Climate change has become a major challenge for agricultural development at both global and national levels. Rising temperatures, shifts in rainfall patterns, more frequent extreme weather events, and disruptions in water availability have affected the productivity of various agricultural commodities in Indonesia. This article aims to review the development of adaptive cropping systems as a strategy for responding to climate change and to examine their role in improving productivity, resource-use efficiency, and agroecosystem resilience. This study employed a directed narrative literature review by selecting relevant national and international articles using PRISMA-based principles. The findings indicate that adjustment of planting calendars, modification of cropping patterns, crop diversification and rotation, efficient water and nutrient management, use of climate information, and implementation of climate-smart agriculture principles can reduce the risk of crop failure and improve production stability. However, the implementation of adaptive cropping systems still faces several constraints, including limited access to information, farmer capacity, market access, capital, and institutional support. Therefore, the integration of adaptive technologies, local knowledge, extension services, and location-specific policies is essential to accelerate the adoption of adaptive cropping systems and support sustainable agriculture in Indonesia.

Keywords: adaptive cropping system, climate change, cropping calendar, crop diversification, agroecosystem resilience, sustainable agriculture

PENDAHULUAN

Sektor pertanian memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan pangan, penyediaan bahan baku industri, sumber pendapatan petani, dan pembangunan ekonomi nasional. Namun, sistem produksi pertanian di Indonesia masih sangat bergantung pada stabilitas iklim, terutama

pola curah hujan, suhu udara, ketersediaan air, dan kesesuaian musim tanam. Perubahan iklim yang ditandai oleh peningkatan suhu, perubahan distribusi hujan, dan meningkatnya kejadian ekstrem telah memengaruhi produktivitas, luas tanam, luas panen, dan stabilitas hasil pertanian (Widiarta, 2016; Wihardjaka *et al*., 2020; IPCC, 2022).

Secara global, perubahan iklim meningkatkan tekanan terhadap sistem pangan melalui penurunan hasil tanaman, gangguan faktor biotik dan abiotik, perubahan ketersediaan air, serta peningkatan risiko ekonomi pada petani (Grigorieva *et al*., 2023; Ma & Rahut, 2024). Dampak tersebut tidak hanya terjadi pada aspek produksi, tetapi juga pada efisiensi penggunaan air, serapan hara, dinamika organisme pengganggu tanaman, dan keberlanjutan agroekosistem. Oleh karena itu, strategi adaptasi pertanian perlu diarahkan pada pendekatan yang tidak hanya meningkatkan hasil, tetapi juga memperkuat ketahanan sistem produksi terhadap ketidakpastian iklim (Zheng *et al*., 2024).

Di Indonesia, dampak perubahan iklim sangat dirasakan pada sistem pertanian yang bergantung pada curah hujan, terutama sawah tadah hujan dan lahan kering. Lahan sawah tadah hujan memiliki potensi besar dalam mendukung ketersediaan pangan, tetapi rentan terhadap kekeringan, keterlambatan tanam, rendahnya efisiensi pemupukan, dan serangan OPT (Wihardjaka *et al*., 2020). Ketidakpastian curah hujan juga mengubah pola tanam berbasis kebiasaan lokal, sehingga petani memerlukan informasi iklim dan kalender tanam yang lebih adaptif (Runtunuwu *et al*., 2013; Dharma & Banowati, 2024).

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk menjawab tantangan tersebut adalah *Climate-smart agriculture* (CSA). CSA bertujuan meningkatkan produktivitas dan pendapatan pertanian, memperkuat kapasitas adaptasi dan resiliensi, serta menekan emisi gas rumah kaca (Lipper *et al*., 2014; Zheng *et al*., 2024). Dalam konteks sistem pertanaman, prinsip CSA dapat diterjemahkan melalui penyesuaian waktu tanam, pengaturan pola tanam, varietas adaptif, diversifikasi dan rotasi tanaman, efisiensi air dan hara, pengendalian OPT terpadu, serta pemanfaatan informasi iklim (Barua & Mitra, 2024; Lou *et al*.,2024).

Diversifikasi dan rotasi tanaman menjadi komponen penting dalam sistem pertanaman adaptif karena mampu meningkatkan biodiversitas, pengendalian hama, siklus hara, kesuburan tanah, dan regulasi air tanpa menurunkan hasil tanaman (Tamburini *et al*., 2020; Beillouin *et al*., 2021). Rotasi tanaman yang lebih beragam juga terbukti meningkatkan stabilitas hasil pada kondisi kurang menguntungkan, termasuk kekeringan (Bowles *et al*., 2020). Dengan demikian, sistem pertanaman adaptif tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi, tetapi juga pada pengurangan risiko dan penguatan fungsi agroekosistem.

Dalam konteks Indonesia, pengembangan sistem pertanaman adaptif perlu diarahkan pada integrasi teknologi adaptasi, informasi iklim, inovasi spesifik lokasi, dan kelembagaan petani. Teknologi seperti Kalender Tanam Terpadu, pengelolaan tanaman terpadu, irigasi berselang, pemupukan berimbang, varietas adaptif, dan penguatan penyuluhan dapat menjadi basis adaptasi di tingkat petani (Widiarta, 2016; Wihardjaka *et al*., 2020; Murni & Purnama, 2020). Namun, penerapannya masih menghadapi kendala berupa keterbatasan akses informasi, kapasitas petani, modal, pasar, dan dukungan kelembagaan (Ma & Rahut, 2024; Khatibu & Ngowi, 2025).

Berdasarkan uraian tersebut, artikel review ini bertujuan untuk mengkaji pengembangan sistem pertanaman adaptif dalam menghadapi perubahan iklim di Indonesia, menganalisis kontribusinya terhadap produktivitas dan resiliensi agroekosistem, serta mengidentifikasi tantangan dan prospek implementasinya. Kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam pengembangan strategi pertanian adaptif yang lebih produktif, efisien, dan berkelanjutan.

METODE REVIEW LITERATUR

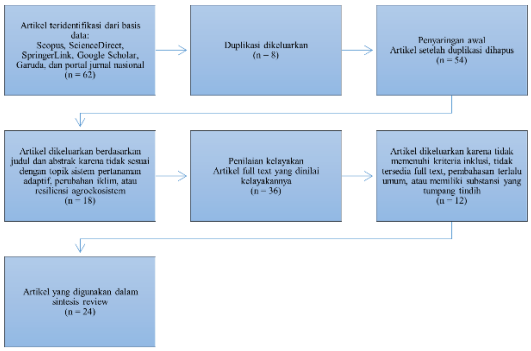
Artikel ini disusun menggunakan metode review literatur dengan pendekatan sintesis naratif-terarah. Pendekatan ini digunakan karena topik sistem pertanaman adaptif bersifat multidimensional, meliputi perubahan

iklim, sistem pertanaman, produktivitas, efisiensi penggunaan sumber daya, resiliensi agroekosistem, dan kelembagaan petani. Penelusuran literatur dilakukan melalui Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, Garuda, serta portal jurnal nasional yang relevan.

Kata kunci yang digunakan meliputi *climate change adaptation*, *climate-smart agriculture*, *adaptive cropping system*, *crop diversification*, *crop rotation*, *agroecosystem resilience*, *sustainable agriculture*, *cropping calendar*, sistem pertanaman adaptif, perubahan iklim, kalender tanam, diversifikasi tanaman, rotasi tanaman, pertanian berkelanjutan, dan resiliensi agroekosistem. Artikel yang diprioritaskan adalah publikasi periode 2020-2026. Beberapa literatur sebelum tahun 2020 tetap digunakan apabila memiliki kontribusi konseptual, kebijakan, atau teknologi yang penting bagi konteks adaptasi pertanian di Indonesia.

Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel berasal dari jurnal ilmiah nasional maupun internasional, prosiding ilmiah, atau publikasi akademik yang relevan; (2) membahas adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim, CSA, sistem pertanaman adaptif, kalender tanam, diversifikasi, rotasi, efisiensi air-hara, atau resiliensi agroekosistem; (3) tersedia dalam bentuk teks lengkap; dan (4) relevan dengan pertanian tropis atau konteks Indonesia. Artikel yang terlalu umum, tidak tersedia teks lengkap, tidak berkaitan langsung dengan sistem pertanaman, atau memiliki substansi berulang dikeluarkan dari kajian.

Proses seleksi dilakukan melalui tahap identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan penentuan artikel yang digunakan dalam sintesis dengan mengacu pada prinsip PRISMA (Page *et al*., 2021). Artikel ini tidak dimaksudkan sebagai systematic review penuh, tetapi menggunakan prinsip seleksi sistematis untuk menjaga keterlacakan sumber dan relevansi artikel. Alur seleksi literatur disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur seleksi literatur berdasarkan prinsip PRISMA

Berdasarkan proses seleksi tersebut, diperoleh 24 artikel utama yang digunakan dalam sintesis review. Artikel utama terdiri atas publikasi internasional dan nasional yang membahas perubahan iklim, CSA, sistem pertanaman adaptif, kalender tanam, diversifikasi dan rotasi tanaman, efisiensi sumber daya, serta resiliensi agroekosistem. Untuk memperkuat argumentasi, artikel ini juga menggunakan beberapa referensi pendukung yang relevan, sehingga total sumber yang disitasi berada pada rentang 30-40 referensi.

Data dari literatur dianalisis secara deskriptif-komparatif dan disintesis secara naratif. Sintesis dilakukan dengan mengelompokkan temuan ke dalam tujuh tema utama, yaitu dampak perubahan iklim terhadap sistem pertanian, konsep sistem pertanaman adaptif, penyesuaian pola dan kalender tanam, diversifikasi dan rotasi tanaman, efisiensi penggunaan air dan hara, resiliensi agroekosistem, serta tantangan dan prospek implementasi di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dampak Perubahan Iklim terhadap Sistem Pertanian

Perubahan iklim merupakan faktor eksternal yang memengaruhi keberlanjutan sistem pertanian karena pertumbuhan tanaman sangat ditentukan oleh suhu, curah hujan, ketersediaan
air, kelembapan tanah, dan kejadian iklim ekstrem. Perubahan pada faktor-faktor tersebut dapat
mengganggu fase pertumbuhan, pola tanam, produktivitas, dan stabilitas hasil. Grigorieva *et al*. (2023) menegaskan bahwa perubahan

iklim memberi tekanan pada sektor pertanian melalui
penurunan hasil, perubahan luas tanam dan panen, gangguan faktor biotik-abiotik, serta peningkatan kerugian ekonomi.

Dampak perubahan iklim terhadap pertanian dapat bersifat langsung dan tidak langsung. Dampak langsung terlihat melalui peningkatan suhu, perubahan curah hujan, banjir, kekeringan, angin kencang, dan salinitas pada wilayah tertentu. Dampak tidak langsung terjadi melalui peningkatan tekanan OPT, perubahan dinamika hama dan penyakit, serta terganggunya ketersediaan air dan hara. Widiarta (2016) menjelaskan bahwa perubahan iklim dapat memengaruhi produktivitas, pola tanam, indeks panen, luas panen, dan luas kawasan pertanian.

Pada tingkat global, perubahan iklim meningkatkan ketidakpastian produksi tanaman dan mengganggu pasokan pangan. Ma & Rahut (2024) menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat menurunkan produktivitas dan meningkatkan ketidakstabilan produksi pertanian, sedangkan IPCC (2022) menegaskan bahwa sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang sangat rentan terhadap peningkatan intensitas dan frekuensi kejadian ekstrem. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan iklim berhubungan langsung dengan ketahanan pangan dan kesejahteraan petani.

Di Indonesia, lahan sawah tadah hujan menjadi salah satu agroekosistem yang paling rentan karena sumber airnya sangat bergantung pada curah hujan. Wihardjaka *et al*. (2020) menyebutkan bahwa kendala utama sawah tadah hujan meliputi ketidakpastian air, kesuburan tanah yang relatif rendah, dan kerentanan terhadap kekeringan serta OPT. Pergeseran distribusi hujan dapat menyebabkan keterlambatan waktu tanam, kekurangan air pada fase kritis, dan penurunan hasil.

Ketidakpastian iklim juga memengaruhi keputusan manajemen budidaya di tingkat petani. Dharma & Banowati (2024) menunjukkan bahwa perubahan curah hujan menyebabkan petani sawah tadah hujan perlu menyesuaikan kalender tanam agar produktivitas tetap terjaga. Hal ini diperkuat oleh Murni dan Purnama (2020) yang menunjukkan bahwa penetapan jadwal tanam berdasarkan kebiasaan lokal dapat kurang optimal apabila tidak didukung oleh data curah hujan dan prakiraan iklim.

Selain itu, perubahan iklim dapat meningkatkan tekanan OPT. Barua dan Mitra (2024) menjelaskan bahwa perubahan suhu dan kelembapan dapat mempercepat perkembangan hama dan penyakit serta memperluas wilayah sebarannya. Dalam konteks tanaman pangan Indonesia, Widiarta (2016) juga menekankan bahwa perubahan iklim dapat memicu ledakan hama dan penyakit, sehingga adaptasi pertanian perlu mengintegrasikan pengelolaan air, hara, varietas, dan OPT secara terpadu.

Secara keseluruhan, perubahan iklim menyebabkan dampak kompleks pada sistem pertanian, mulai dari penurunan produktivitas, perubahan pola tanam, keterbatasan air, penurunan efisiensi hara, hingga peningkatan risiko OPT. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pertanian yang hanya mengandalkan pola musim historis semakin sulit dipertahankan.Oleh karena itu, diperlukan sistem pertanaman adaptif yang mampu menyesuaikan waktu tanam, pola tanam, pilihan komoditas, serta pengelolaan sumber daya berdasarkan kondisi iklim yang semakin dinamis.

Konsep Sistem Pertanaman Adaptif

Sistem pertanaman adaptif merupakan pendekatan pengelolaan budidaya tanaman yang dirancang untuk meningkatkan kemampuan sistem pertanian dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan iklim, variabilitas cuaca, dan tekanan lingkungan. Sistem ini tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil, tetapi juga pada stabilitas produksi, efisiensi penggunaan sumber daya, dan ketahanan agroekosistem (Grigorieva *et al*., 2023; Widiarta, 2016).

Secara konseptual, sistem pertanaman adaptif sejalan dengan CSA. Lipper *et al*. (2014) menjelaskan bahwa CSA berorientasi pada transformasi sistem pertanian agar mampu mendukung ketahanan pangan di bawah tekanan perubahan iklim. Zheng *et al*. (2024) menegaskan bahwa CSA memiliki tiga tujuan utama, yaitu meningkatkan produktivitas, memperkuat adaptasi dan

resiliensi, serta mengurangi emisi gas rumah kaca. Dalam kerangka ini, sistem pertanaman adaptif menjadi bentuk penerapan prinsip CSA pada level pola tanam dan teknologi budidaya.

Sistem pertanaman adaptif tidak dapat dipandang sebagai satu teknologi tunggal. Ma & Rahut (2024) menunjukkan bahwa adopsi CSA dipengaruhi oleh penyuluhan, pelatihan, akses kredit, organisasi petani, informasi iklim, modal sosial, dan kelembagaan. Dengan demikian, keberhasilan sistem pertanaman adaptif ditentukan oleh interaksi antara teknologi, kapasitas petani, dukungan kelembagaan, dan kesesuaian agroekosistem.

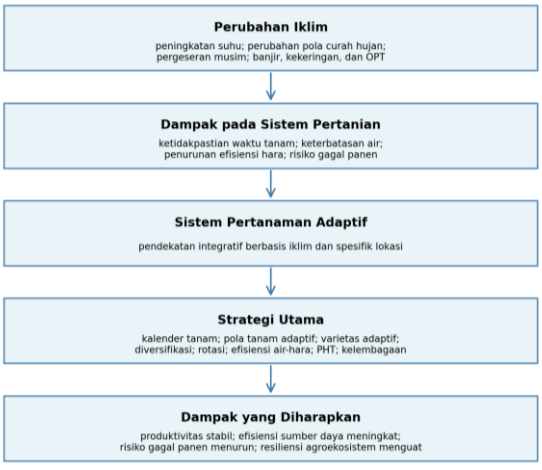
Strategi utama dalam sistem pertanaman adaptif meliputi penyesuaian waktu tanam berbasis informasi iklim, pengaturan pola tanam, penggunaan varietas adaptif, diversifikasi dan rotasi tanaman, efisiensi air dan hara, pengelolaan OPT terpadu, serta penguatan penyuluhan. Wihardjaka *et al*. (2020) menunjukkan bahwa teknologi adaptif pada sawah tadah hujan dapat mencakup kalender tanam, varietas unggul, embung, pengairan berselang, pemupukan berimbang, amelioran, dan PHT. Prinsip-prinsip tersebut diringkas pada Tabel 1.

Tabel 1. Prinsip-Prinsip Sistem Pertanaman Adaptif dan Manfaatnya

Prinsip	**Bentuk penerapan**	**Manfaat**
Waktu tanam	Kalender tanam berbasis iklim	Menurangi gagal tanam/panen
Pola tanam	Penyesuaian pola tanam dengan curah hujan	Meningkatkan efisiensi lahan
Varietas adaptif	Varietas toleran cekaman	Menjaga stabilitas hasil
Diversifikasi	Tumpangsari, tanaman sela, agroforestri	Menurangi risiko produksi
Rotasi	Pergiliran tanaman	Memperbaiki tanah dan memutus OPT
Air	Irigasi berselang, embung, konservasi air	Menurangi dampak kekeringan
Hara	Pemupukan berimbang/spesifik lokasi	Meningkatkan efisiensi pupuk
Kelembagaan	Penyuluhan, kelompok tani, layanan digital	Memperce pat adopsi teknologi

Sumber: Disintesis dari Zheng *et al*. (2024), Ma & Rahut (2024), Barua dan Mitra (2024), Widiarta (2016), Wihardjaka *et al*. (2020), Runtunuwu *et al*. (2013), Tamburini *et al*. (2020), dan Bowles *et al*. (2020).

Tabel 1 menunjukkan bahwa sistem pertanaman adaptif bersifat integratif. Setiap prinsip saling berhubungan: kalender tanam membantu menentukan waktu budidaya, pola tanam dan varietas adaptif menyesuaikan sistem produksi dengan kondisi musim, sedangkan diversifikasi, rotasi, dan pengelolaan air-hara memperkuat fungsi ekologis agroekosistem. Kerangka hubungan antara tekanan perubahan iklim, dampak pertanian, strategi adaptasi, dan hasil yang diharapkan disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka konseptual sistem pertanaman adaptif dalam menghadapi perubahan iklim

Gambar 2 menunjukkan bahwa sistem pertanaman adaptif berperan sebagai strategi penghubung antara tekanan perubahan iklim

dan upaya peningkatan produktivitas, efisiensi sumber daya, serta resiliensi agroekosistem. Dengan demikian, strategi adaptasi tidak cukup dilakukan secara parsial, tetapi perlu diintegrasikan melalui kalender tanam, pola tanam adaptif, diversifikasi, rotasi, efisiensi air dan hara, serta penguatan kelembagaan petani.

Penyesuaian Pola dan Kalender Tanam

Penyesuaian pola dan kalender tanam merupakan strategi adaptasi yang paling konkret dalam menghadapi perubahan iklim. Pergeseran awal musim hujan, ketidakpastian lama musim tanam, perubahan distribusi curah hujan, serta meningkatnya banjir dan kekeringan membuat penentuan waktu tanam menjadi semakin penting. Ketidaktepatan waktu tanam dapat menyebabkan tanaman mengalami cekaman air pada fase kritis, meningkatkan risiko OPT, dan menurunkan hasil.

Kalender tanam berfungsi sebagai instrumen pengambilan keputusan untuk menentukan waktu tanam berdasarkan curah hujan, ketersediaan air, prakiraan iklim, dan kebutuhan tanaman. Runtunuwu *et al*. (2013) menjelaskan bahwa Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu menyediakan informasi awal waktu tanam, wilayah rawan banjir, kekeringan, serangan OPT, serta rekomendasi varietas, benih, dan pupuk pada skala kecamatan. Dengan demikian, kalender tanam menjadi penghubung antara informasi iklim dan keputusan budidaya.

Pada sawah tadah hujan, kalender tanam berperan penting karena sumber air sangat bergantung pada hujan. Wihardjaka *et al*. (2020) menekankan bahwa kalender tanam perlu dipadukan dengan varietas unggul, embung, pemupukan berimbang, pengelolaan lahan, dan PHT agar risiko kekeringan dapat dikurangi. Pendekatan ini menunjukkan bahwa kalender tanam bukan hanya alat penentuan tanggal tanam, tetapi juga bagian dari paket teknologi adaptasispesifik lokasi.

Penyesuaian kalender tanam juga berkaitan dengan pengaturan pola tanam. Murni dan Purnama (2020) menunjukkan bahwa penerapan Kalender Tanam Terpadu mampu mengubah pola palawija-bera-padi menjadi palawija-padi-padi. Perubahan tersebut meningkatkan pemanfaatan lahan dan intensitas pertanaman karena lahan yang sebelumnya dibiarkan bera dapat ditanami kembali berdasarkan kesesuaian musim dan ketersediaan air.

Konsep kalender tanam adaptif tidak hanya relevan pada tanaman pangan semusim. Sarvina *et al*. (2020) menunjukkan bahwa kalender budidaya berbasis fase fenologi dan informasi iklim dapat digunakan pada tanaman kopi untuk menyesuaikan kegiatan budidaya dengan kondisi iklim. Artinya, prinsip kalender adaptif dapat diterapkan pada berbagai komoditas selama informasi iklim, fase pertumbuhan tanaman, dan kebutuhan teknis budidaya diintegrasikan secara tepat.

Keberhasilan kalender tanam juga ditentukan oleh kapasitas petani dan penyuluh. Dharma & Banowati (2024) melaporkan bahwa 83,3% petani pada sawah tadah hujan di Desa Keben memahami dan menyusun kalender tanam sederhana, tetapi penyuluh tetap berperan penting dalam memberikan informasi dan pendampingan. Khatibu dan Ngowi (2025) juga menegaskan bahwa layanan informasi iklim akan lebih efektif apabila dirancang secara partisipatif dan sesuai kebutuhan petani.

Dengan demikian, penyesuaian pola dan kalender tanam berperan dalam mengurangi risiko akibat ketidakpastian curah hujan, meningkatkan ketepatan waktu tanam, memperbaiki intensitas pertanaman, dan mendukung efisiensi input. Dalam konteks Indonesia, penguatan Kalender Tanam Terpadu perlu terus dilakukan melalui pembaruan data iklim, peningkatan akses informasi, penyuluhan, dan integrasi dengan rekomendasi teknologi spesifik lokasi.

Diversifikasi dan Rotasi Tanaman sebagai Strategi Adaptasi

Diversifikasi dan rotasi tanaman merupakan komponen utama sistem pertanaman adaptif karena keduanya mengurangi risiko produksi pada kondisi iklim yang tidak menentu. Sistem monokultur cenderung lebih rentan terhadap kekeringan, banjir, peningkatan suhu, dan ledakan OPT karena hanya bergantung pada satu jenis

tanaman. Sebaliknya, sistem yang lebih beragam dapat meningkatkan stabilitas produksi karena setiap tanaman memiliki respons berbeda terhadap cekaman (Lin, 2011; Tamburini *et al*., 2020).

Diversifikasi dapat dilakukan melalui tumpangsari, rotasi, tanaman sela, agroforestri, tanaman penutup tanah, atau integrasi tanaman dengan komponen ekosistem lainnya. Tamburini *et al*. (2020) menunjukkan bahwa diversifikasi pertanian meningkatkan biodiversitas, polinasi, pengendalian hama, siklus hara, kesuburan tanah, dan regulasi air tanpa menurunkan hasil. Beillouin *et al*. (2021) juga menunjukkan bahwa efek diversifikasi umumnya positif terhadap produksi dan jasa ekosistem, walaupun besarnya efek dipengaruhi konteks agroekologi.

Diversifikasi meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya karena perbedaan sistem perakaran, arsitektur tajuk, umur tanaman, dan kebutuhan hara memungkinkan tanaman memanfaatkan cahaya, air, dan nutrien secara lebih komplementer. Sridhar *et al*. (2026) melaporkan bahwa sistem diversifikasi seperti tumpangsari, agroforestri, rotasi, dan konservasi mampu meningkatkan hasil, memperbaiki karbon organik tanah, serta menurunkan ketergantungan input sintetis.

Rotasi tanaman merupakan bentuk diversifikasi temporal yang dilakukan dengan menggilir jenis tanaman pada lahan yang sama. Bowles *et al*. (2020) menunjukkan bahwa rotasi yang lebih beragam meningkatkan hasil jagung rata-rata dan mengurangi kehilangan hasil pada kondisi kekeringan. Kluger *et al*. (2025) menambahkan bahwa manfaat rotasi bergantung pada tanaman sebelumnya, urutan rotasi, dan kondisi cuaca, sehingga desain rotasi perlu mempertimbangkan agroekosistem dan risiko iklim.

Dalam jangka panjang, diversifikasi juga mendukung kualitas tanah dan jasa ekosistem. Raveloaritiana dan Wanger (2024) menunjukkan bahwa diversifikasi pertanian meningkatkan profitabilitas, biodiversitas, kualitas tanah, pengaturan air, siklus hara, dan penyimpanan karbon. Jones *et al*. (2021) menyediakan basis data global yang menunjukkan bahwa praktik diversifikasi menjadi salah satu jalan penting untuk meningkatkan biodiversitas dan hasil secara bersamaan.

Di Indonesia, diversifikasi dan rotasi dapat diterapkan melalui rotasi padi-palawija, integrasi legum, tumpangsari, atau pola tanam adaptif berbasis ketersediaan air. Pada lahan sawah tadah hujan, rotasi padi dengan palawija atau legum dapat mengoptimalkan lahan ketika air tidak cukup untuk padi. Hal ini sejalan dengan Murni dan Purnama (2020) yang menunjukkan bahwa pola tanam berbasis KATAM dapat meningkatkan pemanfaatan lahan dan produksi.

Namun, penerapan diversifikasi dan rotasi memerlukan dukungan pasar, benih, modal, tenaga kerja, dan penyuluhan. Petani cenderung enggan mengubah pola tanam apabila komoditas alternatif tidak memiliki kepastian harga atau saluran pemasaran. Oleh karena itu, diversifikasi perlu didukung rekomendasi spesifik lokasi, insentif ekonomi, dan kelembagaan yang memadai agar berfungsi sebagai strategi adaptasi yang layak secara agronomis dan ekonomi (Ma & Rahut,2024; Khatibu & Ngowi, 2025).

Efisiensi Penggunaan Air dan Hara

Efisiensi penggunaan air dan hara menjadi komponen penting dalam sistem pertanaman adaptif karena perubahan iklim dapat menimbulkan dua kondisi ekstrem, yaitu kekurangan air pada musim kering dan kelebihan air pada periode hujan intensif. Kedua kondisi tersebut dapat menghambat pertumbuhan tanaman, menurunkan serapan hara, meningkatkan kehilangan nutrien, dan memperbesar risiko penurunan hasil (Zheng *et al*., 2024).

Pada lahan sawah, ketersediaan air menentukan keberhasilan produksi. Wihardjaka *et al*., (2020) menyatakan bahwa sawah tadah hujan rentan terhadap kekeringan karena sumber airnya bergantung pada hujan. Teknologi seperti pengairan berselang, embung, pengelolaan lahan, pemilihan varietas adaptif, dan kalender tanam dapat menekan risiko kekurangan air. Pada sistem padi irigasi, alternate wetting and drying (AWD) juga menjadi strategi penting karena dapat mengurangi kebutuhan air dan

emisi metana tanpa selalu menurunkan hasil (Zhao *et al*., 2024).

Efisiensi air tidak hanya ditentukan oleh teknik irigasi, tetapi juga oleh pengaturan waktu dan pola tanam. Runtunuwu *et al*. (2013) menunjukkan bahwa Kalender Tanam Terpadu menyediakan informasi waktu tanam, risiko banjir dan kekeringan, serta rekomendasi varietas dan pupuk. Informasi ini membantu petani menghindari periode berisiko tinggi sehingga penggunaan air dan input produksi menjadi lebih tepat.

Efisiensi hara juga menjadi aspek penting karena pemupukan yang tidak sesuai kebutuhan tanaman menyebabkan pemborosan input, rendahnya efisiensi serapan hara, pencemaran lingkungan, dan peningkatan biaya produksi. Chivenge *et al*. (2021) menunjukkan bahwa sitespecific nutrient management (SSNM) pada padi dapat meningkatkan hasil, keuntungan, dan efisiensi nitrogen sekaligus menurunkan kehilangan nitrogen dan emisi. Shankar *et al*. (2021) juga menekankan pentingnya pengelolaan hara spesifik lokasi untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi nutrien padi.

Diversifikasi dan rotasi tanaman dapat memperkuat efisiensi hara melalui peningkatan siklus hara dan kesehatan tanah. Tanaman legum membantu meningkatkan ketersediaan nitrogen melalui fiksasi biologis, sedangkan rotasi dengan sistem perakaran berbeda memperbaiki eksplorasi hara pada lapisan tanah yang berbeda. Tamburini *et al*. (2020) menunjukkan bahwa diversifikasi mampu meningkatkan siklus hara dan kesuburan tanah tanpa mengorbankan hasil.

Dalam kerangka CSA, efisiensi air dan hara berhubungan langsung dengan peningkatan produktivitas, adaptasi, dan mitigasi. Pengelolaan input yang lebih tepat dapat menekan biaya produksi, mengurangi emisi, dan menjaga kualitas tanah. Namun, penerapan teknologi tersebut memerlukan kapasitas petani, akses informasi, penyuluhan, dan dukungan kelembagaan agar rekomendasi teknis dapat diterapkan secara benar (Ma & Rahut, 2024; Chivenge *et al*., 2021).

Dengan demikian, efisiensi penggunaan air dan hara perlu dikembangkan secara spesifik lokasi. Pada sawah tadah hujan, strategi dapat berupa penyesuaian waktu tanam, varietas genjah/toleran kekeringan, embung, dan pemupukan berimbang. Pada lahan kering, strategi dapat diarahkan pada konservasi tanah-air, bahan organik, tanaman penutup tanah, dan diversifikasi dengan tanaman toleran kekeringan. Integrasi strategi tersebut menjadi dasar penting bagi pertanian yang efisien dan tahan terhadap perubahan iklim.

Peran Sistem Pertanaman Adaptif dalam Meningkatkan Resiliensi Agroekosistem

Resiliensi agroekosistem adalah kemampuan sistem pertanian untuk bertahan, menyesuaikan diri, dan pulih kembali setelah mengalami tekanan lingkungan seperti kekeringan, banjir, peningkatan suhu, serangan OPT, serta perubahan ketersediaan air dan hara. Dalam konteks perubahan iklim, resiliensi menjadi penting karena sistem pertanian tidak cukup hanya mengejar produktivitas, tetapi juga harus menjaga stabilitas hasil dan fungsi ekosistem (Altieri *et al*., 2015; Dittmer *et al*., 2023).

Sistem pertanaman adaptif meningkatkan resiliensi melalui diversifikasi komponen tanaman. Diversifikasi menciptakan keragaman hayati dalam ruang dan waktu sehingga sistem pertanian tidak bergantung pada satu komoditas. Tamburini *et al*. (2020) menunjukkan bahwa diversifikasi meningkatkan biodiversitas, pengendalian hama, polinasi, siklus hara, kesuburan tanah, dan regulasi air. Fungsi-fungsi tersebut menjadi fondasi ekologis bagi agroekosistem yang lebih tahan terhadap cekaman.

Rotasi tanaman memperkuat resiliensi melalui perbaikan kualitas tanah, pemutusan siklus hama dan penyakit, serta peningkatan stabilitas hasil. Bowles *et al*. (2020) menunjukkan bahwa rotasi yang lebih beragam mengurangi kehilangan hasil pada kondisi kekeringan. Temuan ini sejalan dengan Lin (2011) yang menekankan bahwa diversifikasi dapat meningkatkan kemampuan sistem pertanian untuk menahan variabilitas iklim dan gangguan biotik.

Resiliensi juga berkaitan dengan kualitas tanah dan jasa ekosistem. Raveloaritiana dan Wanger (2024) menunjukkan bahwa

diversifikasi jangka panjang meningkatkan kualitas tanah, pengaturan air, siklus hara, dan penyimpanan karbon. Tanah yang sehat memiliki kapasitas lebih baik dalam menyimpan air, menyediakan hara, dan mendukung aktivitas mikroorganisme sehingga tanaman lebih mampu bertahan pada kondisi cekaman.

Selain dimensi biofisik, resiliensi agroekosistem memiliki dimensi sosial-ekonomi. Peterson *et al*. (2020) menunjukkan bahwa sistem integrasi tanaman-ternak dapat mencapai hasil tanaman yang sebanding dengan sistem khusus pada banyak kondisi, sementara Mabhaudhi *et al*. (2023) menegaskan bahwa sistem tanaman-ternak di Global South berkontribusi pada diversifikasi, ketahanan pangan, siklus hara, dan resiliensi petani. Strategi integratif seperti ini relevan sebagai opsi adaptasi pada wilayah pertanian tropis.

Pada tingkat lokal, resiliensi sangat dipengaruhi oleh kemampuan petani dalam membaca perubahan iklim dan menyesuaikan praktik budidaya. Runtunuwu *et al*. (2013) menunjukkan bahwa Kalender Tanam Terpadu dapat membantu petani mengurangi risiko kegagalan tanam melalui informasi waktu tanam dan wilayah rawan bencana. Dharma & Banowati (2024) menunjukkan bahwa pengetahuan lokal petani dapat menjadi modal adaptasi apabila diperkuat oleh penyuluhan dan informasi iklim yang mudah diakses.

Dengan demikian, sistem pertanaman adaptif memperkuat resiliensi agroekosistem melalui peningkatan biodiversitas, kesehatan tanah, efisiensi air-hara, stabilisasi hasil, pengurangan risiko OPT, dan penguatan kapasitas petani. Diversifikasi, rotasi, kalender tanam, pengelolaan air, pemupukan berimbang, serta kelembagaan penyuluhan perlu dipandang sebagai komponen yang saling berhubungan dalam membangun pertanian yang tangguh terhadap perubahan iklim.

Tantangan dan Prospek Implementasi di Indonesia

Implementasi sistem pertanaman adaptif di Indonesia memiliki prospek besar, tetapi juga menghadapi tantangan teknis, sosial, ekonomi, dan kelembagaan. Keragaman agroekosistem Indonesia menyebabkan strategi adaptasi tidak dapat diterapkan secara seragam. Teknologi yang sesuai untuk sawah irigasi belum tentu cocok untuk sawah tadah hujan, lahan kering, lahan rawa, atau kawasan dataran tinggi. Oleh karena itu, sistem pertanaman adaptif harus berbasis spesifik lokasi.

Tantangan teknis utama adalah ketidakpastian iklim yang semakin tinggi. Pergeseran musim, banjir, kekeringan, salinitas, serta ledakan OPT membuat perencanaan budidaya semakin kompleks (Widiarta, 2016; IPCC, 2022). Kondisi ini menuntut petani untuk menggunakan informasi iklim dan rekomendasi teknologi, bukan hanya mengandalkan pola musim historis.

Tantangan berikutnya adalah keterbatasan akses dan pemanfaatan informasi iklim. Meskipun Indonesia telah memiliki Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu, keberhasilannya bergantung pada pembaruan data, akurasi informasi, kemampuan penyuluh, dan literasi petani. Runtunuwu *et al*. (2013) menunjukkan bahwa sistem ini membutuhkan koordinasi antara lembaga penelitian, BPTP, BMKG, dinas pertanian, penyuluh, dan kelompok tani. Tanpa jaringan penyuluhan yang kuat, informasi iklim sulit diterjemahkan menjadi keputusan budidaya.

Dari sisi sosial-ekonomi, petani menghadapi keterbatasan modal, akses pasar, ketersediaan benih, tenaga kerja, dan risiko perubahan komoditas. Diversifikasi dan rotasi tanaman membutuhkan kepastian pasar agar petani bersedia mengadopsi komoditas alternatif. Ma & Rahut (2024) menunjukkan bahwa adopsi praktik CSA sangat dipengaruhi oleh akses kredit, penyuluhan, pelatihan, organisasi petani, dan informasi iklim. Karena itu, teknologi adaptif harus layak secara agronomis sekaligus ekonomi.

Kelembagaan menjadi faktor kunci dalam mempercepat implementasi. Penyuluh, kelompok tani, BPTP, dinas pertanian, perguruan tinggi, dan pemerintah daerah perlu berperan dalam validasi teknologi, pelatihan, dan pendampingan. Khatibu dan

Ngowi (2025) menunjukkan bahwa layanan informasi iklim yang bersifat partisipatif dan sesuai konteks lokal lebih efektif dibandingkan model top-down. Hal ini menunjukkan pentingnya melibatkan petani sejak tahap perencanaan teknologi adaptif.

Prospek pengembangan sistem pertanaman adaptif di Indonesia tetap besar karena berbagai teknologi pendukung telah tersedia, seperti Kalender Tanam Terpadu, varietas unggul adaptif, Pengelolaan Tanaman Terpadu, pemupukan berimbang, pengairan berselang, embung, PHT, dan layanan informasi iklim (Wihardjaka *et al*., 2020). Pengembangan teknologi digital juga membuka peluang percepatan penyebaran rekomendasi waktu tanam, prediksi banjir-kekeringan, rekomendasi varietas, dan pemupukan.

Dengan demikian, implementasi sistem pertanaman adaptif perlu diarahkan pada pendekatan terpadu yang menggabungkan teknologi, informasi iklim, kelembagaan, pasar, dan kapasitas petani. Integrasi pengetahuan lokal dengan ilmu pengetahuan modern menjadi penting agar teknologi adaptasi sesuai dengan kondisi sosial dan agroekologi petani. Dukungan kebijakan, insentif, dan penyuluhan akan menentukan sejauh mana sistem pertanaman adaptif dapat mendukung produktivitas, efisiensi sumber daya, dan ketahanan pangan nasional.

Implikasi Praktis dan Arah Pengembangan Sistem Pertanaman Adaptif

Pengembangan sistem pertanaman adaptif memiliki implikasi praktis yang penting bagi perencanaan pertanian di Indonesia. Strategi adaptasi tidak cukup hanya diarahkan pada penyediaan teknologi, tetapi perlu diterjemahkan menjadi paket rekomendasi yang mudah diterapkan petani sesuai karakteristik agroekosistem. Pada sawah tadah hujan, prioritas adaptasi dapat diarahkan pada penyesuaian kalender tanam, penggunaan varietas genjah atau toleran kekeringan, pengelolaan air melalui embung, pemupukan berimbang, dan pengendalian OPT terpadu. Sementara itu, pada lahan kering, strategi adaptasi dapat difokuskan pada konservasi tanah dan air, penggunaan bahan organik, tanaman penutup tanah, rotasi dengan legum, serta diversifikasi komoditas yang lebih toleran terhadap cekaman air (Wihardjaka et al., 2020; Runtunuwu et al., 2013; Murni & Purnama, 2020).

Implikasi berikutnya adalah perlunya penguatan sistem informasi iklim yang dapat diakses dan dipahami oleh petani. Kalender Tanam Terpadu telah menjadi salah satu instrumen penting dalam mendukung keputusan waktu tanam, rekomendasi varietas, pemupukan, dan antisipasi risiko banjir, kekeringan, serta OPT. Namun, efektivitas sistem informasi tersebut sangat bergantung pada kualitas data, kecepatan pembaruan informasi, media penyampaian, dan kemampuan petani dalam menerjemahkan informasi menjadi keputusan budidaya. Oleh karena itu, layanan informasi iklim perlu dikembangkan secara lebih partisipatif dengan melibatkan penyuluh, kelompok tani, pemerintah daerah, dan lembaga penelitian agar rekomendasi yang diberikan sesuai dengan kondisi lokal (Runtunuwu et al., 2013; Dharma & Banowati, 2024; Khatibu & Ngowi, 2025).

Dari sisi kelembagaan, sistem pertanaman adaptif memerlukan penguatan peran penyuluh sebagai jembatan antara teknologi dan petani. Penyuluh tidak hanya berfungsi menyampaikan informasi, tetapi juga mendampingi petani dalam memilih pola tanam, menentukan waktu tanam, menyesuaikan dosis pupuk, memilih varietas, serta mengevaluasi risiko iklim pada setiap musim. Dalam kondisi perubahan iklim yang semakin dinamis, penyuluhan pertanian perlu bergeser dari pendekatan instruktif menuju pendekatan konsultatif dan adaptif. Artinya, penyuluh dan petani bersama-sama menilai kondisi lapangan, membaca informasi iklim, serta menyusun strategi budidaya yang paling sesuai dengan sumber daya yang tersedia (Ma & Rahut, 2024; Barua & Mitra, 2024).

Arah pengembangan berikutnya adalah memperkuat integrasi antara diversifikasi tanaman, rotasi tanaman, dan efisiensi penggunaan input. Diversifikasi tidak hanya dipandang sebagai upaya menambah jenis tanaman, tetapi juga sebagai strategi untuk meningkatkan stabilitas hasil, memperbaiki

siklus hara, mengurangi tekanan hama, serta menurunkan risiko ekonomi akibat kegagalan satu komoditas. Rotasi dengan tanaman legum dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen, memperbaiki kesehatan tanah, dan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis. Dengan demikian, desain pola tanam adaptif perlu mempertimbangkan aspek agronomis, ekologis, dan ekonomi secara bersamaan (Tamburini et al., 2020; Bowles et al., 2020; Beillouin et al., 2021; Sridhar et al., 2026).

Sistem pertanaman adaptif juga perlu diarahkan pada penguatan ekonomi petani. Salah satu kendala utama diversifikasi dan rotasi tanaman adalah ketidakpastian pasar bagi komoditas alternatif. Petani akan sulit mengadopsi pola tanam baru apabila komoditas yang ditanam tidak memiliki kepastian harga, akses pasar, atau nilai ekonomi yang layak. Oleh karena itu, kebijakan adaptasi pertanian perlu dihubungkan dengan pengembangan rantai nilai, penguatan kelembagaan ekonomi petani, akses pembiayaan, dan dukungan pasar. Tanpa dukungan ekonomi, sistem pertanaman adaptif berisiko hanya menjadi rekomendasi teknis yang sulit diterapkan secara luas (Ma & Rahut, 2024; Khatibu & Ngowi, 2025).

Ke depan, penelitian mengenai sistem pertanaman adaptif di Indonesia perlu diarahkan pada pengujian teknologi secara spesifik lokasi. Setiap wilayah memiliki perbedaan iklim mikro, jenis tanah, ketersediaan air, pola tanam, komoditas dominan, dan kapasitas petani. Oleh karena itu, penelitian lapangan yang menguji kombinasi kalender tanam, varietas adaptif, diversifikasi tanaman, efisiensi air-hara, dan pengendalian OPT terpadu perlu diperbanyak. Kajian berbasis data iklim, percobaan lapangan, pemodelan pola tanam, serta evaluasi sosial-ekonomi petani akan membantu menghasilkan rekomendasi adaptasi yang lebih presisi (Randall et al., 2024; Wihardjaka et al., 2020; Chivenge et al., 2021).

Dengan demikian, pengembangan sistem pertanaman adaptif di Indonesia perlu diposisikan sebagai strategi jangka panjang dalam pembangunan pertanian berkelanjutan. Sistem ini bukan hanya berkaitan dengan perubahan teknik budidaya, tetapi juga mencakup penguatan informasi iklim, kelembagaan penyuluhan, kapasitas petani, akses pasar, dan dukungan kebijakan. Integrasi berbagai aspek tersebut akan menentukan keberhasilan sistem pertanaman adaptif dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi sumber daya, resiliensi agroekosistem, dan ketahanan pangan nasional (Altieri et al., 2015; Dittmer et al., 2023; Zheng et al., 2024).

KESIMPULAN

Perubahan iklim memberikan tekanan besar terhadap sistem pertanian melalui peningkatan suhu, ketidakpastian curah hujan, pergeseran musim tanam, banjir, kekeringan, dan peningkatan tekanan OPT. Dampak tersebut menyebabkan sistem pertanian yang bergantung pada pola musim historis semakin rentan terhadap penurunan produktivitas dan ketidakstabilan hasil.

Sistem pertanaman adaptif merupakan pendekatan integratif yang mencakup penyesuaian waktu tanam, pengaturan pola tanam, penggunaan varietas adaptif, diversifikasi dan rotasi tanaman, efisiensi air dan hara, PHT, serta pemanfaatan informasi iklim. Pendekatan ini sejalan dengan CSA karena menggabungkan tujuan produktivitas, adaptasi, resiliensi, dan keberlanjutan lingkungan.

Penyesuaian pola dan kalender tanam merupakan strategi yang sangat relevan bagi Indonesia, terutama pada sawah tadah hujan dan lahan kering. Kalender Tanam Terpadu dapat membantu petani menentukan waktu tanam, mengantisipasi risiko banjir dan kekeringan, serta memilih varietas dan pemupukan yang sesuai dengan kondisi musim.

Diversifikasi dan rotasi tanaman berperan dalam meningkatkan biodiversitas, siklus hara, kesuburan tanah, pengendalian hama, efisiensi sumber daya, dan stabilitas hasil. Strategi ini juga dapat mengurangi risiko ekonomi petani karena sistem produksi tidak bergantung pada satu komoditas saja.

Efisiensi penggunaan air dan hara menjadi kunci dalam menghadapi ketidakpastian iklim. Pengairan berselang, embung, konservasi air,

pemupukan berimbang, SSNM, bahan organik, dan integrasi legum dapat membantu meningkatkan produktivitas sekaligus menekan pemborosaninput dan kerusakan lingkungan.

Implementasi sistem pertanaman adaptif di Indonesia masih menghadapi kendala berupa keterbatasan akses informasi iklim, kapasitas petani yang beragam, keterbatasan modal, risiko pasar, dan belum meratanya dukungan kelembagaan. Namun, prospeknya besar karena Indonesia telah memiliki teknologi adaptasi, sistem informasi kalender tanam, jaringan penyuluhan, dan pengalaman lokal petani.

Berdasarkan hasil review, pengembangan sistem pertanaman adaptif di Indonesia perlu diarahkan pada pendekatan spesifik lokasi, partisipatif, berbasis informasi iklim, dan didukung kelembagaan yang kuat. Integrasi teknologi modern, pengetahuan lokal, penyuluhan, pasar, dan kebijakan menjadi kunci untuk memperkuat produktivitas, efisiensi sumber daya, resiliensi agroekosistem, dan ketahanan pangan nasional.

DAFTAR PUSTAKA

Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development, 35*, 869–890. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2

Barua, P., & Mitra, A. (2024). Review on climate smart agriculture practice: A global perspective. *Journal of Climate Change, 10*(1), 11–20. https://doi.org/10.3233/JCC240003

Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of *crop diversification* on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology, 27*(19), 4697–4710. https://doi.org/10.1111/gcb.15747

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*, 284–293. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007

Chivenge, P., Sharma, S., Bunquin, M. A., & Hellin, J. (2021). Improving nitrogen use efficiency: A key for sustainable rice production systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 5*, 737412. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.737412

Dharma, A. S., & Banowati, E. (2024). Pengetahuan petani Kendeng tentang kalender tanam pada sawah tadah hujan Desa Keben Kecamatan Tambakromo Kabupaten Pati. *Edu Geography, 12*(1), 81–90. https://doi.org/10.15294/edugeo.v11i2.69710

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*, 333–342. https://doi.org/10.1007/s00267-023-01816-x

Giannarakis, G., Tsoumas, I., Neophytides, S., Papoutsa, C., Kontoes, C., & Hadjimitsis, D. (2023). *Understanding the impacts of crop diversification in the context of climate change: A machine learning approach*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2307.08617

Grigorieva, E., Livenets, A., & Stelmakh, E. (2023). Adaptation of agriculture to climate change: A scoping review.

Climate, 11(10), 202. https://doi.org/10.3390/cli11100202

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Jones, S. K., Sánchez, A. C., Juventia, S. D., & Estrada-Carmona, N. (2021). A global database of diversified farming effects on biodiversity and yield. *Scientific Data, 8*, 212. https://doi.org/10.1038/s41597-021-01000-y

Khatibu, S., & Ngowi, E. (2025). Effectiveness of climate information services in Sub-Saharan Africa's agricultural sector: A systematic review of what works, what doesn't work, and why. *Frontiers in Climate, 7*, 1616691. https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1616691

Kluger, D. M., Di Tommaso, S., & Lobell, D. B. (2025). *Precrop payoffs: Causal machine learning reveals large but variable yield benefits of crop rotation in major breadbaskets*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2506.02384

Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through *crop diversification*: Adaptive management for environmental change. *BioScience, 61*(3), 183–193. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4

Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D., Henry, K., Hottle, R., Jackson, L., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeldt, H., Remington, T., Sen, P. T., Sessa, R., Shula, R., Tibu, A., & Torquebiau, E. F. (2014). *Climate-smart agriculture* for food security. *Nature Climate Change, 4*, 1068–1072. https://doi.org/10.1038/nclimate2437

Lou, Y., Feng, L., Xing, W., Hu, N., Noellemeyer, E., Le Cadre, E., Minamikawa, K., Muchaonyerwa, P., AbdelRahman, M. A. E., Machado Pinheiro, E. F., de Vries, W., Liu, J., Chang, S. X., Zhou, J., Sun, Z., Hao, W., & Mei, X. (2024). *Climate-smart agriculture*: Insights and challenges. *Climate Smart Agriculture, 1*(1), 100003. https://doi.org/10.1016/j.csag.2024.100003

Ma, W., & Rahut, D. B. (2024). *Climate-smart agriculture*: Adoption, impacts, and implications for sustainable development. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 29*, 44. https://doi.org/10.1007/s11027-024-10139-z

Mabhaudhi, T., Chibarabada, T. P., & Sikka, A. (2023). Status of integrated crop-livestock research in the mixed farming systems of the Global South: A scoping study. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 7*, 1241675. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1241675

Murni, W. S., & Purnama, H. (2020). Pengembangan pola tanam tanaman pangan dengan introduksi teknologi Kalender Tanam (KATAM) Terpadu. Dalam S. Herlinda *et al*. (Eds.), *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal ke-8 Tahun 2020* (pp. 1057–1064). Penerbit & Percetakan Universitas Sriwijaya. https://conference.unsri.ac.id/index.php/lahansuboptimal/article/view/2006

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for

reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Perdinan, Boer, R., & Kartikasari, K. (2008). Linking *climate change adaptation* options for rice production and sustainable development in Indonesia. *Jurnal Agromet, 22*(2), 94–107. https://journal.ipb.ac.id/index.php/agromet

Peterson, C. A., Deiss, L., & Gaudin, A. C. M. (2020). Commercial integrated crop-livestock systems achieve comparable crop yields to specialized production systems: A meta-analysis. *PLOS ONE, 15*(5), e0231840. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231840

Randall, M., Schiller, K., Lewis, A., Montgomery, J., & Alam, M. S. (2024). A systematic review of crop planning optimisation under climate change. *Water Resources Management, 38*, 1867–1881. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03758-3

Raveloaritiana, E., & Wanger, T. C. (2024). *Decades matter: Agricultural diversification increases financial profitability, biodiversity, and ecosystem services over time*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2403.05599

Runtunuwu, E., Syahbuddin, H., Ramadhani, F., Pramudia, A., Setyorini, D., Sari, K., Apriyana, Y., Susanti, E., & Haryono. (2013). Inovasi kelembagaan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu mendukung adaptasi perubahan iklim untuk ketahanan pangan nasional. *Pengembangan Inovasi Pertanian, 6*(1), 44–52. https://media.neliti.com/media/publications/30885-ID-institutional-innovation-of-integrated-cropping-calendar-information-system-to-s.pdf

Sarvina, Y., June, T., Surmaini, E., Nurmalina, R., & Hadi, S. S. (2020). Strategi peningkatan produktivitas kopi serta adaptasi terhadap variabilitas dan perubahan iklim melalui kalender budidaya. *Jurnal Sumberdaya Lahan, 14*(2), 65–78. https://ejurnal.litbang.pertanian.go.id/index.php/jsl

Shankar, T., Banerjee, M., Malik, G. C., Dutta, S., & Maitra, S. (2021). The productivity and nutrient use efficiency of rice-rice cropping system in response to site-specific nutrient management. *Sustainability, 13*(6), 3222. https://doi.org/10.3390/su13063222

Sridhar, R., Longkumer, L. T., Pilla, A., Bharteey, P. K., Jatav, H. S., Hareesh, D., Vilakar, K., Singh, A. P., Srikar, K., Aruna, K., & Paarshitha Reddy, M. S. (2026). Diverse fields for stronger yields: *Crop diversification* strategies for *sustainable agriculture* and climate-resilient ecosystems. *Frontiers in Agronomy, 7*, 1746895. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1746895

Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., van der Heijden, M. G. A., Liebman, M., & Hallin, S. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances, 6*(45), eaba1715. https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715

Widiarta, I. N. (2016). Teknologi pengelolaan tanaman pangan dalam beradaptasi terhadap perubahan iklim pada lahan sawah. *Jurnal Sumberdaya Lahan, 10*(2), 91–102. https://ejurnal.litbang.pertanian.go.id/index.php/jsl

Wihardjaka, A., Pramono, A., & Sutriadi, M. T. (2020). Peningkatan produktivitas padi sawah tadah hujan melalui penerapan teknologi adaptif dampak perubahan iklim. *Jurnal Sumberdaya Lahan, 14*(1), 25–36.

https://ejurnal.litbang.pertanian.go.id/index.php/jsl

Yulianto. (2016). Agroekologi: Model pertanian berkelanjutan masa depan. *Jurnal Tambora, 1*(3). https://jurnal.uts.ac.id/index.php/Tambora

Zhao, C., Wang, H., Chen, D., Zhang, Y., & Liu, S. (2024). Effects of alternate wetting and drying irrigation on methane and nitrous oxide emissions from rice fields: A meta-analysis. *Global Change Biology, 30*(12), e17581. https://doi.org/10.1111/gcb.17581

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*, 28. https://doi.org/10.1007/s11027-024-10124-6