

STUDI PUSTAKA: PENGARUH EVAPOTRANSPIRASI TERHADAP MIKROKLIMAT DAN IMPLIKASINYA TERHADAP PENGENDALIAN ORGANISME PENGGANGGU TANAMAN

Nhyra Kamala Putri^{1*}, Yusrizal², Dewi Andriani³, Evi Julianita Harahap⁴, Kasmawati⁵

^{1,2,3,4} Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Teuku Umar

⁵ Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

Corresponding author: nhyra.kamalaputri@utu.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRACT/ABSTRAK
Diterima: 13-11-2025 Direvisi: 02-12-2025 Dipublikasi: 02-01-2026	Literature Study: The Effect of Evapotranspiration on Microclimate and Its Implications for Control of Plant Pests
Keywords: evapotranspiration, microclimate, plant pest organisms, PPO control, sustainable agriculture. Kata kunci: evapotranspirasi, mikroklimat, organisme pengganggu tanaman, pengendalian OPT, pertanian berkelanjutan	Evapotranspiration (ET), the combined process of evaporation from the soil surface and transpiration from plants, plays a crucial role in forming the microclimate around vegetation. This microclimate significantly influences humidity, temperature, and leaf wetness duration, which are key factors in the dynamics of Plant Pest Organisms (PPOs), such as pests and pathogens. This study aims to examine the relationship between evapotranspiration and the microclimate and its implications for PPO control. The method employed is a literature review, analyzing various relevant journals and scientific sources published within the last ten years. The findings indicate that managing evapotranspiration through techniques such as precision irrigation, selecting appropriate plant varieties, regulating planting distance and timing, controlling shading, ecological engineering and refugia utilization, and employing remote sensing and microclimate sensor technology can suppress excessive humidity that supports PPO development. This approach is not only relevant for PPO control but also supports water use efficiency and climate change adaptation. This review is expected to contribute to the development of ecology- and technology-based sustainable agriculture strategies, particularly in addressing future food production challenges. As a recommendation, integrating ET strategies into Integrated Pest Management (IPM) systems supported by spatial data and artificial intelligence (AI) should be gradually implemented at small scales, with collaborative involvement of researchers, extension agents, and farmers to ensure both technical effectiveness and socioeconomic relevance in tropical agricultural contexts. Evapotranspirasi (ET) merupakan gabungan proses evaporasi dari permukaan tanah dan transpirasi dari tanaman yang berperan penting dalam pembentukan mikroklimat di sekitar vegetasi. Mikroklimat ini memengaruhi kelembaban, suhu, dan durasi basah daun, yang menjadi faktor utama dalam dinamika organisme pengganggu tanaman (OPT) seperti hama dan patogen. Artikel review ini bertujuan untuk mengkaji hubungan antara ET dan mikroklimat serta implikasinya terhadap pengendalian OPT. Metode yang digunakan adalah studi pustaka dengan menelaah berbagai jurnal dan sumber ilmiah yang relevan dalam sepuluh tahun terakhir. Hasil kajian menunjukkan bahwa pengelolaan ET melalui teknik irigasi presisi, pemilihan varietas tanaman, pengaturan jarak dan waktu tanam, pengaturan naungan, rekayasa ekologi dan refugia, serta pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dan sensor mikroklimat dapat menekan kelembaban berlebih yang mendukung perkembangan OPT. Pendekatan ini tidak hanya relevan dalam konteks pengendalian OPT, tetapi juga mendukung efisiensi penggunaan air dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi pertanian berkelanjutan yang berbasis ekologi dan teknologi, khususnya dalam menghadapi tantangan produksi pangan di masa depan. Sebagai rekomendasi, integrasi strategi ET dalam sistem Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) serta pemanfaatan data spasial dan kecerdasan buatan/<i>Artificial Intelligence</i> (AI) perlu dikembangkan secara bertahap, dimulai dari skala kecil, dengan dukungan kolaboratif antara peneliti, penyuluh, dan petani.

PENDAHULUAN

Evapotranspirasi (ET) merupakan proses penting dalam pengelolaan air pada ekosistem pertanian, mencakup evaporasi dari permukaan tanah, dan transpirasi dari tanaman. Penelitian oleh Wei *et al.* (2017) menunjukkan bahwa komponen transpirasi memberikan kontribusi signifikan terhadap total evapotranspirasi daratan global (*global terrestrial ET*), terutama pada vegetasi yang mendominasi

wilayah daratan. Selain itu, tekanan panas (*heat stress*) akibat suhu tinggi dapat menurunkan laju transpirasi dan mengubah pola ET pada beberapa jenis tanaman (Yang *et al.*, 2023). Perubahan pola ET berdampak langsung pada pengaturan mikroklimat di sekitar tanaman, termasuk kelembaban dan suhu, yang memengaruhi durasi basah daun dan risiko serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) (Wang *et al.*, 2020;

Hossain *et al.*, 2024; Mosedale *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024; Yusuf *et al.*, 2025). Hal ini menegaskan bahwa pemahaman dan pengendalian evapotranspirasi menjadi dasar penting dalam menjaga keseimbangan mikroklimat dan ketahanan tanaman terhadap OPT.

Evapotranspirasi (ET) berperan penting dalam membentuk kondisi mikroklimat di sekitar tanaman, terutama melalui pengaruhnya terhadap suhu dan kelembapan di sekitar tanaman. Proses ET melepaskan uap air ke atmosfer dan menyerap energi panas laten, sehingga menurunkan suhu permukaan dan meningkatkan kelembapan udara lokal (Fausan *et al.*, 2020). Selain itu, ET juga mengatur keseimbangan kelembapan tanah melalui evaporasi dari permukaan dan transpirasi akar, yang memengaruhi ketersediaan air dan kondisi mikroba di zona perakaran (Santri *et al.*, 2025). Liu *et al.* (2025) mencatat bahwa perbedaan sumber air irigasi memengaruhi kelembapan mikro dan aktivitas mikroba tanah, yang menunjukkan bahwa pengelolaan air melalui ET berdampak pada dinamika mikroklimat. Ketika ET tidak optimal, misalnya akibat irigasi berlebih atau defisit air, kondisi mikroklimat yang terbentuk dapat memperpanjang durasi basah daun dan meningkatkan risiko infeksi patogen (Bailey *et al.*, 2024). Dengan demikian, pengaruh ET terhadap mikroklimat memiliki implikasi penting dalam pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT), karena suhu dan kelembapan yang tidak terkendali dapat mempercepat siklus hidup hama dan meningkatkan virulensi penyakit (Alfizar & Nasution, 2024).

Pendekatan-pendekatan pengelolaan ET menjadi landasan penting dalam sistem pertanian presisi untuk mengurangi kondisi mikroklimat yang mendukung serangan OPT. Mikroklimat yang dihasilkan oleh tanaman merupakan faktor kunci dalam dinamika OPT karena dapat memengaruhi siklus hidup dan virulensi hama serta penyakit (Hossain *et al.*, 2024; Mosedale *et al.*, 2024; Yusuf *et al.*, 2025). Pada sistem pertanian padi dan gandum, pengelolaan ET yang optimal terbukti mampu menurunkan tekanan lingkungan, seperti kelembapan berlebih di sekitar tanaman dan durasi basah daun yang panjang, yang mendukung perkembangan patogen (Roby & Kallarackal, 2017; Pan *et al.*, 2018). Beberapa pendekatan pengelolaan ET seperti teknik irigasi presisi, pengaturan jarak tanam, dan pengaturan naungan dapat menekan risiko serangan OPT melalui pengurangan kelembapan mikro di sekitar tanaman (Leiwakabessy *et al.*, 2020; Rahayu *et al.*, 2021; Bashyala *et al.*, 2022; Ganesh & Roka, 2024). Optimalisasi ET pada varietas tanaman yang tahan terhadap cekaman kekeringan juga dapat menurunkan risiko serangan OPT (Nemeskéri *et al.*, 2019; M'hamdi *et al.*, 2023). Deteksi dini serangan OPT melalui integrasi data mikroklimat dengan algoritma SEBAL (*Surface Energy Balance*

Algorithm for Land), teknologi citra multispektral, dan RGB (*Red, Green, Blue*) berperan penting dalam pengambilan keputusan mengenai tindakan pengendalian OPT yang tepat sehingga risiko serangan OPT dapat diminimalisir (Zhang *et al.*, 2018; Bhattarai *et al.*, 2019; Gobbo *et al.*, 2019). Lebih lanjut, Angon *et al.* (2023) dan Sharma (2023) mengemukakan bahwa data mikroklimat dan ET yang terintegrasi dengan sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) terbukti efektif dalam mengurangi risiko kehilangan hasil pertanian akibat serangan OPT. Selain itu, pemantauan berkelanjutan terhadap ET dan mikroklimat menjadi strategi penting dalam menghadapi variabilitas iklim dan menjaga produktivitas pertanian (Singh *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2016). Oleh karena itu, integrasi pengelolaan ET ke dalam praktik pertanian presisi menjadi langkah strategis dalam menghadapi ancaman OPT dan variabilitas iklim.

Studi literatur ini mengkaji hubungan antara ET, mikroklimat, dan pengendalian OPT terutama tentang kompleksitas interaksi dalam sistem pertanian. Pengelolaan ET yang baik dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan kesehatan tanaman, serta memainkan peran strategis dalam mengurangi kerugian akibat penyakit dan hama, serta mendukung adaptasi terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, review artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara mendalam peran ET dalam pembentukan mikroklimat dan implikasinya terhadap pengendalian OPT melalui pendekatan studi literatur.

BAHAN DAN METODE

Pengumpulan data dilakukan menggunakan metode studi pustaka (*literature review*) dengan pendekatan kualitatif deskriptif. Kajian dilakukan melalui penelusuran dan analisis terhadap berbagai sumber literatur ilmiah yang relevan dengan topik ET, mikroklimat, dan pengendalian OPT. Sumber literatur yang digunakan merupakan publikasi dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir (2015–2025) guna memastikan kebaruan dan relevansi informasi. Proses pengumpulan data dilakukan dengan menelusuri basis data ilmiah seperti *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, dan *Garuda*. Penelusuran dilakukan menggunakan kata kunci seperti *evapotranspiration*, *microclimate*, *plant pest control*, *humidity and disease*, dan *agroecosystem*. Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kriteria relevansi terhadap topik, kredibilitas sumber, serta kesesuaian dengan konteks agroekosistem tropis, khususnya kondisi pertanian di Indonesia.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan pendekatan sintesis tematik. Setiap literatur yang dikaji diidentifikasi tema utamanya, kemudian diklasifikasikan berdasarkan fokus kajian seperti pengaruh ET terhadap kelembapan, suhu, dan dinamika OPT. Hasil-hasil dari berbagai sumber

tersebut disintesis untuk menemukan pola hubungan dan implikasi praktis dalam pengendalian OPT. Interpretasi akhir dilakukan untuk merumuskan kesimpulan dan rekomendasi yang dapat diterapkan dalam praktik pertanian berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep ET dan Perannya dalam Pembentukan Mikroklimat Pertanian

ET merupakan komponen kunci dalam siklus hidrologi dan dinamika energi di lingkungan pertanian. Secara konseptual, ET adalah gabungan dari dua proses fisiologis dan fisik yang saling terkait, yaitu evaporasi dan transpirasi (Lakhiar *et al.*, 2024). Evaporasi merujuk pada penguapan air dari permukaan tanah, badan air, dan permukaan tanaman yang tidak terlibat langsung dalam proses fisiologis (Small *et al.*, 2018; Al-Hasani *et al.*, 2025). Proses ini dipengaruhi oleh faktor atmosferik seperti suhu udara, kelembaban relatif, kecepatan angin, dan intensitas radiasi matahari (Hogan *et al.*, 2020; Zhuang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023). Sementara itu, transpirasi adalah pelepasan uap air dari jaringan tanaman, —khususnya melalui stomata pada permukaan daun, yang dipengaruhi oleh status bukaan stomata, ketersediaan air tanah, dan tekanan osmotik dalam jaringan tanaman (Xing *et al.*, 2021). Kedua proses ini tidak hanya berperan dalam pengembalian air ke atmosfer, tetapi juga dalam menjaga keseimbangan termal dan kelembaban tanah. Ketika ET berlangsung secara optimal, tanaman mampu menyerap air secara efisien tanpa mengalami stres hidrik, dan kelembaban tanah tetap berada dalam kisaran yang mendukung aktivitas fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis dan pertumbuhan akar (Jiang *et al.*, 2019). Dengan demikian, ET menjadi indikator penting dalam penilaian kesehatan ekosistem pertanian dan efisiensi penggunaan air.

Dalam pembentukan mikroklimat di sekitar kanopi tanaman, ET memiliki peran penting dalam mengatur suhu dan kelembaban lokal. ET yang tinggi mendorong pendinginan evaporatif dan penurunan kelembaban relatif, sehingga mempercepat pengeringan permukaan daun dan mengurangi durasi basah daun (Wang *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2024). Kondisi ini menurunkan risiko infeksi patogen berbasis kelembaban seperti jamur dan bakteri (Liu *et al.*, 2023). Sebaliknya, ET yang rendah akibat tekanan lingkungan seperti suhu ekstrem, kekeringan, atau penutupan stomata karena stres abiotik menyebabkan akumulasi kelembaban tinggi di sekitar tajuk tanaman (Moustakas, 2025). Kelembaban yang terperangkap ini memperpanjang durasi basah daun dan menciptakan lingkungan mikro yang mendukung proliferasi patogen serta serangga vektor penyakit (Yasuda *et al.*, 2025). Penurunan ET sering kali dipicu oleh peningkatan hormon stres seperti auksin dan asam absisat yang memicu penutupan stomata dan menghambat

transpirasi (Bharath *et al.*, 2021; Rosa-Diaz *et al.*, 2024). Kelembaban tinggi yang terakumulasi juga menghambat difusi gas, menurunkan efisiensi fotosintesis, dan mempercepat perkembangan infeksi oleh organisme patogen (Nawaz *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pengelolaan ET melalui praktik agronomi seperti pemilihan varietas adaptif, pengaturan jarak tanam, dan manajemen irigasi presisi menjadi strategi penting dalam menciptakan sistem pertanian yang sehat, resilien, dan adaptif terhadap perubahan iklim.

Mikroklimat dan Dinamika OPT

Mikroklimat, khususnya suhu dan kelembaban, merupakan faktor lingkungan utama yang memengaruhi dinamika OPT. Suhu dan kelembaban berperan penting dalam mengatur proses fisiologis, perkembangan, dan reproduksi berbagai jenis OPT (Attri *et al.*, 2024; Oh & Cho, 2025). Perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan suhu dan kelembaban telah dikaitkan dengan meningkatnya intensitas serangan pada sistem budidaya padi, termasuk gangguan oleh serangga pengisap dan penggerek batang, serta penyakit yang disebabkan oleh patogen tular udara dan tular tanah (Oh & Cho, 2025). Pada OPT poikilotherm seperti serangga, peningkatan suhu lingkungan hingga batas optimum dapat mempercepat perkembangan, tetapi suhu ekstrem dapat meningkatkan mortalitas dan menurunkan reproduksi (Buckley *et al.*, 2017). Sementara itu, kelembaban rendah menekan kelangsungan hidup serangga, sedangkan kelembaban tinggi dapat memicu morfotipe invasif seperti sayap panjang pada serangga migran (Hariyadi *et al.*, 2025). Dengan demikian, interaksi suhu dan kelembaban dalam mikroklimat secara langsung menentukan dinamika OPT termasuk intensitas dan sebaran serangan.

Strategi Pengelolaan ET untuk Pengendalian OPT

Pengelolaan ET menjadi komponen penting dalam strategi pengendalian OPT secara berkelanjutan. ET memengaruhi kelembaban dan suhu mikroklimat di sekitar tanaman, yang berdampak langsung pada siklus hidup hama dan patogen. Oleh karena itu, pendekatan-pendekatan berikut dapat diterapkan untuk mengoptimalkan ET dan meminimalkan risiko serangan OPT.

a. Teknik Irigasi Presisi

Pengelolaan irigasi presisi menjadi strategi penting dalam mengatur evapotranspirasi (ET) untuk menekan risiko organisme pengganggu tanaman (OPT), karena mampu menjaga keseimbangan antara kebutuhan fisiologis tanaman dan potensi munculnya hama maupun penyakit. Irigasi presisi berperan dalam mengurangi stres air pada tanaman, yang berdampak pada penguatan sistem imun alami serta peningkatan ketahanan terhadap hama dan penyakit (Zhao, 2023). Leiwakabessy *et al.* (2020)

menambahkan bahwa penerapan teknik irigasi pesisi seperti irigasi tetes dan penjadwalan pemberian air yang tepat pada tanaman padi dapat menekan intensitas infeksi patogen seperti *Magnaporthe oryzae* penyebab penyakit blas melalui pengurangan kelembaban berlebih di permukaan tanah maupun tajuk tanaman. Namun pada tanaman hortikultura, sistem irigasi tetes perlu diatur dengan hati-hati karena lingkungan hangat dan lembab di zona perakaran, meski mendukung pertumbuhan tanaman, juga berpotensi mempercepat aktivitas biologis OPT (Mishra & Mishra, 2023). Gupta *et al.* (2021) mengemukakan bahwa teknik irigasi presisi perlu diintegrasikan dengan penggunaan sensor pintar yang memungkinkan pemantauan kondisi tanah secara *real-time*, sehingga kelembaban yang mendukung patogen dapat ditekan secara optimal sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan air dan efektivitas pengendalian OPT. Singkatnya, irigasi presisi tidak hanya mengoptimalkan efisiensi penggunaan air dalam pengelolaan ET tetapi juga memperkuat sistem pengendalian OPT secara berkelanjutan melalui keseimbangan manfaat dan kewaspadaan risiko.

b. Pemilihan Varietas Tanaman

Varietas yang adaptif terhadap kondisi lingkungan tidak hanya meningkatkan ketahanan terhadap stres abiotik dan serangan hama, tetapi juga berkontribusi pada efisiensi penggunaan air melalui pengaturan ET. Varietas dengan sistem akar yang dalam dan luas mampu menyerap air secara optimal pada kondisi pasokan air rendah, sehingga mengurangi kebutuhan irigasi dan tekanan dari OPT (M'hamdi *et al.*, 2023). Tanaman yang sehat cenderung lebih tahan terhadap patogen dan hama (Kumar *et al.*, 2024; Jasrotia *et al.*, 2025). Selain itu, karakteristik fisiologis seperti *stomatal conductance* dan suhu kanopi juga memengaruhi efisiensi ET (Bao *et al.*, 2025). Tanaman dengan kemampuan stomatal yang baik dapat mempertahankan kelembaban dan produktivitas meskipun dalam kondisi kekeringan, sehingga menurunkan risiko serangan OPT (Nemeskéri *et al.*, 2019). Oleh karena itu, pemilihan varietas yang tepat menjadi kunci dalam pengelolaan ET dan pengendalian OPT secara ekologis, efisien, dan adaptif terhadap perubahan iklim.

c. Pengaturan Jarak dan Waktu Tanam

Pengaturan jarak dan waktu tanam merupakan strategi krusial dalam pengelolaan ET yang berdampak langsung terhadap pengendalian OPT. Jarak tanam yang lebih lebar terbukti meningkatkan sirkulasi udara dan menurunkan kelembaban mikro di sekitar tajuk tanaman, sehingga mengurangi waktu basah daun dan menekan risiko infeksi patogen daun seperti jamur dan bakteri (Bashyala *et al.*, 2022; Ganesh & Roka, 2024). Selain jarak tanam, pengaturan waktu tanam berperan penting

mengendalikan kelembaban dan populasi hama dengan penanaman asinkron di luar periode puncak sehingga tanaman terhindar dari fase rentan hama (Hasyim *et al.*, 2015). Penyesuaian waktu tanam dengan kondisi iklim, seperti menghindari musim hujan atau memilih saat cuaca kering, dapat menekan kelembaban tanah dan udara, sehingga mengurangi peluang infeksi patogen daun akibat kelembapan berkepanjangan (Acheson *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2019; Ganesh & Roka, 2024). Dengan pengaturan jarak dan waktu tanam yang terencana, kelembaban mikro dapat dikendalikan guna menekan risiko serangan OPT, menjadikan strategi ini bagian integral dari pengelolaan ET berkelanjutan.

d. Pengaturan Naungan

Pengaturan naungan yang tepat dalam sistem pertanian berperan penting dalam menjaga kesehatan tanaman dan mengurangi risiko serangan OPT. Naungan yang terencana, seperti dalam sistem agroforestri, terbukti mampu meregulasi iklim mikro melalui pengurangan laju penguapan dan pemeliharaan kelembaban tanah, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih optimal (Rahayu *et al.*, 2021). Naungan yang menciptakan iklim mikro yang stabil berkontribusi pada pengurangan stres abiotik dan mendukung efisiensi proses fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis dan transpirasi (Novitaningrum *et al.*, 2019). Sebaliknya, naungan dengan iklim mikro yang tidak dikelola dengan baik, umumnya ditandai dengan suhu dan kelembaban yang tinggi, dapat mempercepat perkembangan OPT dan meningkatkan risiko serangan OPT (Rowlandson *et al.*, 2015; Alfizar & Nasution, 2024; Oh & Cho, 2025). Rowlandson *et al.* (2015) menekankan bahwa lingkungan mikro yang tidak terkelola dengan baik dapat mempercepat dinamika patogen dan memperburuk epidemi penyakit tanaman. Pada akhirnya, pengaturan naungan yang tepat sebagai pendekatan ekologis dalam sistem pertanian berperan penting dalam pengendalian OPT, karena mampu menjaga kondisi fisiologis tanaman tetap seimbang sehingga tanaman lebih sehat dan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap serangan OPT.

e. Rekayasa Ekologi dan Refugia

Rekayasa ekologi melalui penanaman tanaman refugia terbukti efektif dalam memodulasi iklim mikro pertanian, yang secara langsung berkontribusi terhadap pengendalian OPT. Refugia menciptakan lingkungan lokal yang lebih lembab dan teduh, mengurangi fluktuasi suhu ekstrem, serta memengaruhi distribusi cahaya dan angin (McLaughlin *et al.*, 2017; Ulina & Hasibuan, 2024). Kondisi ini sangat mendukung keberadaan musuh alami seperti parasitoid dan predator, yang membutuhkan kelembaban dan naungan untuk

bertahan hidup dan bereproduksi (Mariantika *et al.*, 2019). Selain itu, peningkatan keanekaragaman tanaman melalui refugia menyediakan sumber daya seperti nektar dan serbuk sari, yang memperkuat mekanisme pengendalian hayati secara alami (Jeavons *et al.*, 2022). Distribusi cahaya yang dimodifikasi melalui kerapatan dan struktur tajuk vegetasi refugia turut menciptakan lingkungan yang lebih nyaman bagi tanaman dan musuh alami, sekaligus menghambat aktivitas makan OPT (McLaughlin *et al.*, 2017; Riddick, 2022; Aminatun *et al.*, 2023; Ulina & Hasibuan, 2024; Zhou *et al.*, 2025). Interaksi antara cahaya dan angin yang diatur oleh tajuk vegetasi refugia mendukung strategi pengelolaan ET berbasis ekologi (Wilkin *et al.*, 2016; Senior *et al.*, 2018; Fahad *et al.*, 2022). Lebih lanjut, integrasi vegetasi refugia dengan kanopi tanaman yang memodifikasi suhu dan angin (Li *et al.*, 2020; Ramos *et al.*, 2023) dapat menciptakan mikroklimat yang lebih seimbang, sehingga memperkuat kesehatan tanaman dan stabilitas ekosistem pertanian. Sehingga dapat ditegaskan bahwa rekayasa ekologi berbasis refugia merupakan pendekatan efektif dalam optimalisasi ET, yang berkontribusi pada pengendalian OPT dan penguatan ketahanan ekosistem pertanian.

f. Pengelolaan OPT melalui Sensor Mikroklimat dan Pengindraan Jauh

Sensor mikroklimat dan pengindraan jauh dapat dimanfaatkan untuk memantau parameter-parameter cuaca dan menyediakan estimasi ET di sekitar tanaman yang berkaitan erat dengan dinamika infeksi patogen dan aktivitas hama. Penerapan sensor mikroklimat dalam praktik pertanian terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air, memperbaiki kesehatan tanaman, dan menurunkan intensitas serangan OPT (Molaie *et al.*, 2023). Gerhards *et al.* (2018) menunjukkan bahwa kelembaban berlebih dan genangan air yang terdeteksi melalui sensor mikroklimat dapat memicu infeksi penyakit tanaman. Di sisi lain, teknologi pengindraan jauh melalui algoritma SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) yang mengintegrasikan data suhu permukaan, indeks vegetasi, dan radiasi untuk memetakan distribusi ET di lahan pertanian, dapat mendukung pengambilan keputusan irigasi presisi dan identifikasi zona risiko penyakit (Gobbo *et al.*, 2019). Teknologi citra multispektral dan RGB juga telah dimanfaatkan untuk mengenali gejala penyakit secara visual pada tanaman padi, memungkinkan respons perlindungan yang lebih cepat dan terarah (Zhang *et al.*, 2018). Teknologi pengindraan jauh telah digunakan untuk mendeteksi infestasi hama pada tanaman sereal, yang memperjelas potensi pendekatan ini dalam mendukung pengendalian OPT secara adaptif dan berbasis data spasial (Bhattarai *et al.*, 2019). Melalui penerapan sensor mikroklimat dan pengindraan jauh, pengelolaan ET dapat dimaksimalkan untuk

menekan perkembangan OPT serta mendukung terciptanya lingkungan pertanian yang sehat, produktif, dan berkelanjutan.

Implikasi terhadap Pertanian Berkelanjutan dan Adaptasi Iklim

a. Peran ET dalam Efisiensi Penggunaan Air

Evapotranspirasi (ET) memiliki peran krusial dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air di sektor pertanian. Teknologi penginderaan jauh, seperti model System for Evaluation of Evapotranspiration (SETMI), memungkinkan pengukuran ET dengan akurasi tinggi, sehingga mendukung penjadwalan irigasi yang efisien dan adaptif terhadap perubahan iklim (Goncalves *et al.*, Meza *et al.*, 2025). Pendekatan berbasis sensor mikroklimat yang terintegrasi dengan AI juga terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi risiko gagal panen akibat cuaca ekstrem (Hatfield & Dold, 2019; Kim & AlZubi, 2024). Irigasi pintar yang memanfaatkan informasi ET terbukti mampu menekan pemborosan air sekaligus menjaga produktivitas hasil panen (Sikka *et al.*, 2018; Abrha & Hagos, 2022). Dengan beragam pendekatan teknologi, peran ET semakin nyata sebagai dasar efisiensi penggunaan air di sektor pertanian.

b. Integrasi ET dan Mikroklimat dalam Sistem PHT

Integrasi ET dan data mikroklimat dalam sistem PHT memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih presisi dalam pengelolaan lingkungan budidaya. Aplikasi AI dalam pengelolaan irigasi menghasilkan keputusan yang lebih tepat mengenai kebutuhan air tanaman, yang sangat penting dalam menghadapi tantangan klimatologis saat ini (Kim & AlZubi, 2024). Dengan analisis data yang canggih, petani mampu merespons variabilitas iklim secara efisien, sekaligus menciptakan kondisi mikroklimat yang kurang mendukung perkembangan OPT (Zidan & Febriyanti, 2024; Singh *et al.*, 2025). Inovasi dalam teknologi pemantauan ET telah membantu petani mengelola sumber air secara lebih efektif, sebagai bagian dari strategi mitigasi terhadap dinamika OPT yang dipengaruhi oleh kelembaban dan suhu mikro (Raza *et al.*, 2023; Comfort *et al.*, 2025). Secara keseluruhan, integrasi ET dan data mikroklimat dalam sistem PHT memperkuat efisiensi penggunaan air sekaligus meningkatkan ketahanan ekosistem pertanian terhadap tekanan iklim dan serangan OPT.

c. Relevansi Kajian terhadap Perubahan Iklim dan Ketahanan Pangan

Pengelolaan ET yang adaptif melalui irigasi tambahan dan manajemen sumber daya air memainkan peran penting dalam memperkuat ketahanan pertanian terhadap perubahan iklim. Praktik pengelolaan berbasis iklim, seperti

pemantauan dan kontrol irigasi, terbukti tidak hanya meningkatkan hasil pertanian tetapi juga membuka peluang peningkatan pendapatan petani (Dawid *et al.*, 2021; Anapalli *et al.*, 2022). Ketika dikombinasikan dengan teknologi sensor dan AI, pengelolaan ET menjadi lebih presisi dan responsif terhadap kondisi lingkungan. Sensor canggih dan algoritma AI memungkinkan pemantauan *real-time* terhadap kesehatan tanaman dan status kelembaban tanah, sehingga petani dapat melakukan penyesuaian irigasi dan pemupukan secara tepat waktu (Ranwa *et al.*, 2024; Manokram, 2025; Mansoor *et al.*, 2025). Penerapan algoritma pembelajaran mesin juga membantu memperkirakan hasil panen dan potensi serangan hama, sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan sebelum masalah menjadi serius (Garg *et al.*, 2025; Aarif *et al.*, 2025; Sabir *et al.*, 2025). Temuan-temuan ini menegaskan relevansi pengelolaan ET adaptif sebagai strategi untuk memperkuat ketahanan pangan di tengah perubahan iklim.

Pendekatan berbasis teknologi tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan melalui pengurangan limbah dan input sintetis yang berlebihan. Integrasi kecerdasan buatan dalam sistem pertanian memungkinkan adaptasi yang lebih responsif terhadap pola cuaca dan stres abiotik, serta optimalisasi siklus tanam melalui analisis data historis dan prediksi cuaca yang akurat (Kumar & Kaur, 2024; Kaya, 2025; Shruthi & Anil, 2025). Untuk mewujudkan sistem produksi yang tangguh dan efisien, pengembangan teknologi harus disertai dengan penerapan praktik cerdas dan kolaborasi lintas pemangku kepentingan, termasuk peneliti, petani, dan pembuat kebijakan (Choudhary *et al.*, 2024; Kadoo & Shivaji, 2025; Keskes, 2025). Dengan demikian, relevansi kajian ET terhadap mikroklimat tidak hanya berdampak pada efisiensi penggunaan air dan pengendalian OPT, tetapi juga menjadi fondasi penting dalam membangun sistem pertanian yang adaptif, berkelanjutan, dan tangguh terhadap perubahan iklim.

Rekomendasi untuk Implementasi Strategi ET dan PHT

Integrasi strategi pengelolaan ET dalam sistem PHT perlu diprioritaskan dalam praktik pertanian tropis yang berkelanjutan. Praktik irigasi presisi berbasis sensor mikroklimat, pemilihan varietas adaptif, serta penyesuaian waktu dan jarak tanam sebaiknya difasilitasi melalui program penyuluhan dan dukungan teknologi sederhana yang dapat diakses petani (Gobbo *et al.*, 2019; M'hamdi *et al.*, 2023). Pendekatan agroekologis seperti penanaman refugia dan pengaturan naungan juga perlu diperluas untuk memperkuat keberadaan musuh alami dan menjaga stabilitas mikroklimat (Rahayu *et al.*, 2021). Pengembangan sistem PHT berbasis data spasial dan AI dapat dimulai dari skala kecil sebagai

model adaptasi iklim yang efektif (Patange *et al.*, 2024; Rabie *et al.*, 2025). Teknologi seperti penginderaan jauh, GIS, dan *machine learning* memungkinkan pemetaan presisi dan intervensi hama yang lebih responsif terhadap kondisi mikroklimat (Roy *et al.*, 2025). Hal ini menunjukkan bahwa penerapan ET dalam sistem PHT menjadi fondasi penting bagi pertanian tropis yang tangguh terhadap perubahan iklim.

Keberhasilan implementasi dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk dukungan teknologi dan kapasitas sumber daya manusia. Kolaborasi antara peneliti, penyuluh, dan petani, serta dukungan pelatihan dan infrastruktur sensor lingkungan dapat meningkatkan efisiensi teknis serta menjawab kebutuhan sosial-ekonomi dalam pertanian tropis yang rentan terhadap perubahan iklim (Vala *et al.*, 2024; Jayadharshan *et al.*, 2025; Khoi, 2025). Dengan kata lain, keberhasilan implementasi pengelolaan ET dalam sistem PHT bergantung pada kombinasi faktor teknis, sosial, dan kelembagaan yang saling mendukung untuk mewujudkan pertanian tropis yang adaptif dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

ET merupakan komponen kunci dalam pembentukan mikroklimat pertanian yang secara langsung memengaruhi dinamika OPT. Kajian ini menunjukkan bahwa pengelolaan ET melalui strategi irigasi presisi, pemilihan varietas adaptif, pengaturan jarak dan waktu tanam, serta pemanfaatan teknologi sensor dan penginderaan jauh dapat menekan kelembaban berlebih yang mendukung perkembangan hama dan patogen. Integrasi ET dan data mikroklimat dalam sistem PHT mendukung pengendalian OPT secara ekologis dan presisi, sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan air dan ketahanan pertanian terhadap perubahan iklim. Temuan ini relevan bagi pengembangan sistem budidaya tropis yang adaptif dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan produksi pangan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aarif K. O., M., Alam, A., & Hotak, Y. (2025). Smart sensor technologies shaping the future of precision agriculture: recent advances and future outlooks. *Journal of Sensors*, 2025(1), 2460098.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1155/js/2460098>
- Abbrha, H., & Hagos, H. (2022). Characterization of changing trends of baseline and future predicted precipitation and temperature of Tigray, Ethiopia. *Journal of Agrometeorology*, 24(3), 235–240.
- Acheson, E. S., Galanis, E., Bartlett, K., & Klinkenberg, B. (2019). Climate classification system-based determination of temperate climate detection of *Cryptococcus gattii* sensu

- lato. *Emerging Infectious Diseases*, 25(9), 1723.
- Al-Hasani, B., Abdellatif, M., Carnacina, I., Harris, C., Al-Quraishi, A. M. F., & Al-Shammari, M. M. A. (2025). Forecasting evaporation trends amid climate change for sustainable water management in semi-arid regions. *Water*, 17(7), 1039. <https://doi.org/10.3390/w17071039>
- Alfizar, & Nasution, S. S. (2024). The explosion of pests and diseases due to climate change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1297(1), 12072.
- Ali, M. P., Bari, M. N., Haque, S. S., Kabir, M. M. M., Afrin, S., Nowrin, F., Islam, M. S., & Landis, D. A. (2019). Establishing next-generation pest control services in rice fields: eco-agriculture. *Scientific Reports*, 9(1), 10180.
- Aminatun, T., Suryadarma, I. G. P., Suhartini, S., & Sujangka, A. (2023). Pengaruh variasi jenis dan peletakan refugia terhadap kemelimpahan serangga pada ekosistem sawah. *Jurnal Penelitian Saintek*, 1(1 SE-Articles), 1–13. <https://doi.org/10.21831/jps.v1i1.58324>
- Anapalli, S. S., Pinnamaneni, S. R., Reddy, K. N., & Singh, G. (2022). Eddy covariance quantification of corn water use and yield responses to irrigations on farm-scale fields. *Agronomy Journal*, 114(4), 2445–2457.
- Angon, P. B., Mondal, S., Jahan, I., Datto, M., Antu, U. B., Ayshi, F. J., & Islam, M. S. (2023). Integrated pest management (IPM) in agriculture and its role in maintaining ecological balance and biodiversity. *Advances in Agriculture*, 2023(1), 5546373.
- Attri, K., Gupta, P., Kansal, S., Gupta, M., Goswami, M., & Thakur, S. (2024). Influence of Temperature and Relative Humidity on Spore Germination and Early Blight Disease Development of Tomato Caused by *Alternaria solani*. *International Journal of Economic Plants*, 11(August), 290–295.
- Bailey, S. L., Morier-Gxoyiya, C., Puthanvila Surendrababu, S., & Saunders, D. G. O. (2024). A history of strategies and a tapestry of triumphant tales in tackling plant fungal diseases. *Plant Pathology*, 73(7), 1619–1628.
- Bao, Y., Liu, T., Duan, L., Tong, X., Wang, Y., Hao, L., Hua, R., & Singh, V. P. (2025). Partitioning of evapotranspiration in semi-arid rain-fed farmland using an improved stomatal conductance model. *Irrigation Science*, 43(4), 773–788. <https://doi.org/10.1007/s00271-025-01022-z>
- Bashyala, S., Poudela, D., & Gautamb, B. (2022). A review on cultural practice as an effective pest management approach under integrated pest management. *Trop. Agroecosyst.(TAEC)*, 3, 34–40.
- Bharath, P., Gahir, S., & Raghavendra, A. S. (2021). Absciscic acid-induced stomatal closure: An important component of plant defense against abiotic and biotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 12, 615114.
- Bhattarai, G. P., Schmid, R. B., & McCornack, B. P. (2019). Remote sensing data to detect hessian fly infestation in commercial wheat fields. *Scientific Reports*, 9(1), 6109.
- Buckley, L. B., Arakaki, A. J., Cannistra, A. F., Kharouba, H. M., & Kingsolver, J. G. (2017). Insect development, thermal plasticity and fitness implications in changing, seasonal environments. *Integrative and Comparative Biology*, 57(5), 988–998.
- Choudhary, R., Mantri, S. P., Barse, M. V. A., & Chitnis, S. (2024). Leveraging AI in smart agro-informatics: a review of data science applications. *International Research Journal on Advanced Engineering and Management (IRJAEM)*, 2(06), 1964–1975.
- Comfort, I., Chinweaku, A. C., Chidinma, J., Nwaizuzu, D., & Paul, E. T. (2025). Advancements in IoT - Based Data Logging for Crop Evapotranspiration Monitoring: Trends and Challenges: A Review. *IJLTEMAS*, XIV(III), 354–360. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS>
- Dawid, I., Workalemahu, S., & Hassen, A. (2021). Small scale irrigation farming adoption as a climate-smart agriculture practice and its impact on household income in Ethiopia: A Review. *International Journal of Food Science and Agriculture*, 5(4).
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., & Yadav, D. K. (2022). Agroforestry systems for soil health improvement and maintenance. *Sustainability*, 14(22), 14877.
- Fausan, A., Setiawan, B. I., Arif, C., & Saptomo, S. K. (n.d.). Analisa model evaporasi dan evapotranspirasi menggunakan pemodelan matematika pada visual basic di Kabupaten Maros. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 5(3 SE-Research Articles), 179–196. <https://doi.org/10.29244/jsil.5.3.179-196>
- Ganesh, G. C., & Roka, P. (2024). Sheath blight of rice: a review of host plant interaction and disease management. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 9(2), 404–408.
- Garg, D., Singh, H., & Shacham-Diamand, Y. (2025). AdapTree: data-driven approach to assessing plant stress through the AI-sensor synergy. *Sensors*, 25(10), 3149.
- Gerhards, M., Schlerf, M., Rascher, U., Udelhoven, T., Juszczak, R., Alberti, G., Miglietta, F., & Inoue, Y. (2018). Analysis of airborne optical and thermal imagery for detection of water stress symptoms. *Remote Sensing*, 10(7),

- 1139.
- Gobbo, S., Lo Presti, S., Martello, M., Panunzi, L., Berti, A., & Morari, F. (2019). Integrating SEBAL with in-field crop water status measurement for precision irrigation applications—A case study. *Remote Sensing*, 11(17), 2069.
- Goncalves, I. Z., Neale, C. M. U., Akasheh, S., & Barker, B. (2023). Remote sensing-based evapotranspiration modeling for several land uses using SETMI model for Nebraska. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXV*, 12727, 267–271.
- Gupta, H. P., Song, H., Sikdar, B., Dutta, T., & Faigl, J. (2021). Guest Editorial Special Issue on Smart Sensing for Agriculture. *IEEE Sensors Journal*, 21(16), 17419.
- Hariyadi, N. N., Rosa, H. O., & Sepe, M. (2025). Rice brown planthopper incidence and diversity of natural enemies in Indonesia. *Indian Journal of Entomology*, 87(1).
- Hasyim, A., Setiawati, W., & Lukman, L. (2015). Inovasi teknologi pengendalian OPT ramah lingkungan pada cabai: upaya alternatif menuju ekosistem harmonis. *Pengembangan Inovasi Pertanian*, 8(1). <https://doi.org/10.21082/pip.v8n1.2015.1-10>
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 10, 103.
- Hogan, P., Parajka, J., Oismüller, M., Heng, L., Strauss, P., & Blöschl, G. (2020). High-frequency stable-isotope measurements of evapotranspiration partitioning in a maize field. *Water*, 12(11), 3048.
- Hossain, M. M., Sultana, F., Mostafa, M., Ferdus, H., Rahman, M., Rana, J. A., Islam, S. S., Adhikary, S., Sannal, A., Al Emran Hosen, M., Nayeema, J., Emu, N. J., Kundu, M., Biswas, S. K., Farzana, L., & Al Sabbir, M. A. (2024). Plant disease dynamics in a changing climate: impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management. In *Discover Agriculture* (Vol. 2, Issue 1). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00144-w>
- Jasrotia, P., Kumari, P., & Kashyap, P. L. (2025). *Next-Gen Strategies in Host Plant Resistance to Insects: Breakthroughs and Future Horizons BT - Cutting Edge Technologies for Developing Future Crop Plants* (A. Mann, N. Kumar, A. Kumar, P. Chandra, S. K. Sanwal, & P. Sheoran (eds.); pp. 219–247). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2508-6_11
- Jayadharshan, S., Marimuthu, S., Gurusamy, A., Kannan, P., Sivamurugan, A. P., Pazhanivelan, S., & Sudarmanian, N. S. (2025). Advancing pulse crop resilience: Leveraging DSSAT for climate-smart agriculture: A comprehensive review. *Plant Science Today*. <https://doi.org/10.14719/pst.8016>
- Jeavons, E., Van Baaren, J., Le Ralec, A., Buchard, C., Duval, F., Llopis, S., Postic, E., & Le Lann, C. (2022). Third and fourth trophic level composition shift in an aphid–parasitoid–hyperparasitoid food web limits aphid control in an intercropping system. *Journal of Applied Ecology*, 59(1), 300–313.
- Jiang, Y., Tang, R., Jiang, X., Li, Z., & Gao, C. (2019). Estimation of soil evaporation and vegetation transpiration using two trapezoidal models from MODIS data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 7647–7664.
- Kadao, A. K., & Shivaji, G. B. (2025). Smart Farming: AI and IoT-Based Solutions for Real-Time Agriculture Monitoring. *SHS Web of Conferences*, 216, 1040.
- Kaya, C. (2025). Optimizing crop production with plant phenomics through high-throughput phenotyping and AI in controlled environments. *Food and Energy Security*, 14(1), e70050.
- Keskes, M. (2025). *Review of The Current State of Deep Learning Applications in Agriculture*.
- Khoi, T. A. (2025). Impacts of climate change on agriculture production in Lam Dong-Vietnam. *Journal of Climate Policy*, 4(1), 37–52.
- Kim, T. H., & AlZubi, A. A. (2024). AI-enhanced precision irrigation in legume farming: optimizing water use efficiency. *Legume Research*, 47(8), 1382–1389.
- Kumar, R., & Kaur, P. (2024). *Handbook of Integrated Weed Management for Major Field Crops*. Bentham Science Publishers.
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Zhang, J., Wang, G., Deng, S., Syed, T. N., Wang, B., & Zhou, R. (2024). A review of evapotranspiration estimation methods for climate-smart agriculture tools under a changing climate: vulnerabilities, consequences, and implications. *Journal of Water and Climate Change*, 16(2), 249–288. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.048>
- Leiwakabessy, C., Inayatri, F., Jambormias, E., Patty, J., & Ririhena, R. E. (2020). Ketahanan enam varietas Padi terhadap penyakit blas (*Pyricularia oryzae* Cav.) pada lahan sawah irigasi dan sawah tadah hujan. *Jurnal Budidaya Pertanian*, 16(2), 147–156.
- Li, W., Wainwright, H. M., Yan, Q., Zhou, H., Dafflon, B., Wu, Y., Versteeg, R., & Tartakovsky, D. M. (2021). Estimation of evapotranspiration rates and root water uptake profiles from soil moisture sensor array data. *Water Resources Research*, 57(11),

- e2021WR030747.
- Li, Y., Huang, X., & Huang, Z. (2020). Behavioral adjustments and support use of François' langur in limestone habitat in Fusui, China: Implications for behavioral thermoregulation. *Ecology and Evolution*, 10(11), 4956–4967.
- Liu, B., Hou, J., Ge, H., Liu, M., Shi, L., Li, C., & Cui, Y. (2023). Comparison of evapotranspiration partitioning and dual crop coefficients of direct-Seeded and transplanted rice in the Poyang Lake basin, China. *Agronomy*, 13(5), 1218.
- Liu, B., Zhao, J., Hou, Y., Jia, H., Huang, Z., Hu, X., Wu, J., & Ying, Y. (2025). Effects of different irrigation water sources on farmland soil microbial communities under drought stress. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 41(10), 405.
- M'hamdi, O., Egei, M., Pék, Z., Ilahy, R., Nemeskéri, E., Helyes, L., & Takács, S. (2023). Root development monitoring under different water supply levels in processing tomato plants. *Plants*, 12(20), 3517.
- Manokaran, J. (2025). AI Powered IOT-Based Smart Agriculture for Sustainable Crop Management. *Interantional Journal Of Scientific Research In Engineering And Management*, 09, 1–9. <https://doi.org/10.55041/IJSREM41447>
- Mansoor, S., Iqbal, S., Popescu, S. M., Kim, S. L., Chung, Y. S., & Baek, J.-H. (2025). Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1587869.
- Mariantika, L., Retnaningdyah, C., & Arisoesilaningsih, E. (2019). Agroecosystem degradation evaluation of broccoli (Brassica oleracea) farm using some biotic indices in Batu, East Java, Indonesia. *Jurnal Pembangunan Dan Alam Lestari*, 10(1).
- McLaughlin, B. C., Ackerly, D. D., Klos, P. Z., Natali, J., Dawson, T. E., & Thompson, S. E. (2017). Hydrologic refugia, plants, and climate change. *Global Change Biology*, 23(8), 2941–2961.
- Meza, K., Torres-Rua, A. F., Hipps, L., Kopp, K., Straw, C. M., Kustas, W. P., Christiansen, L., Coopmans, C., & Gowing, I. (2025). Relating spatial turfgrass quality to actual evapotranspiration for precision golf course irrigation. *Crop Science*, 65(1), e21446.
- Mishra, S., & Mishra, R. C. (2023). Review of the Impact of Drip Irrigation Mulching on Soil Characteristics and Efficiency in Water Usage. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 4373–4383. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i103114>
- Molaei, B., Peters, R. T., Chandel, A. K., Khot, L. R., Stockle, C. O., & Campbell, C. S. (2023). Measuring evapotranspiration suppression from the wind drift and spray water losses for LESA and MESA sprinklers in a center pivot irrigation system. *Water*, 15(13), 2444.
- Mosedale, J. R., Eyre, D., Korycinska, A., Everatt, M., Grant, S., Trew, B., Kaye, N., Hemming, D., & Maclean, I. M. D. (2024). Mechanistic microclimate models and plant pest risk modelling. *Journal of Pest Science*, 97(4), 1749–1766. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01777-y>
- Moustakas, M. (2025). Molecular Mechanisms of Plant Abiotic Stress Tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(6), 2731. <https://doi.org/10.3390/ijms26062731>
- Nawaz, R., Abbasi, N. A., Hafiz, I. A., Khan, M. F., & Khalid, A. (2021). Environmental variables influence the developmental stages of the citrus leafminer, infestation level and mined leaves physiological response of Kinnow mandarin. *Scientific Reports*, 11(1), 7720.
- Nemeskéri, E., Neményi, A., Böcs, A., Pék, Z., & Helyes, L. (2019). Physiological factors and their relationship with the productivity of processing tomato under different water supplies. *Water*, 11(3), 586.
- Novitaningrum, R., Supardi, S., & Marwanti, S. (2019). Efisiensi teknis pengelolaan tanaman terpadu padi sawah di Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Agro Ekonomi*, 37(2), 123–140.
- Oh, S. K., & Cho, Y. S. (2025). Effects of water management practices on rice grain quality and pest-disease incidence in environmentally friendly cultivation systems. *Agriculture*, 15(21), 2244.
- Pan, S., Liu, L., Bai, Z., & Xu, Y.-P. (2018). Integration of remote sensing evapotranspiration into multi-objective calibration of distributed hydrology–soil–vegetation model (DHSVM) in a humid region of China. *Water*, 10(12), 1841.
- Patange, M. J., Abhishek, G. J., Ashwini, T. R., Lakra, T. S., Verma, L. P., Dutt, A., Singh, M. P., Kushwaha, K., & Chanyal, P. C. (2024). Applications of hyperspectral remote sensing, GIS, and artificial intelligence in agriculture. *Archives of Current Research International*, 24(7), 1–13.
- Rabie, A. B., Elhag, M., & Subyani, A. (2025). Remote sensing, GIS, and machine learning in water resources management for arid agricultural regions: a review. *Water*, 17(21), 3125.
- Rahayu, S., Triyogo, A., Widyastuti, S. M., Musyafa', & Ardianyah, F. (2021). Pests and diseases on Falcataria moluccana trees in agroforestry systems with pineapple in East Java, Indonesia. *Biodiversitas*, 22(5), 2779–

2788.
<https://doi.org/10.13057/biodiv/d220541>
- Ramos, R. F., Franco, A. M. A., Gilroy, J. J., & Silva, J. P. (2023). Combining bird tracking data with high-resolution thermal mapping to identify microclimate refugia. *Scientific Reports*, 13(1), 4726. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31746-x>
- Ranwa, M., Sri, K. R., Khare, A., Kumar, V., Kumar, K., Rajeshwar, J. R., & Niharika, N. (2024). A summative review of advances in sensor technology for precision agriculture. *Archives of Current Research International*, 24(10 SE-Review Article), 257–275. <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i10929>
- Raza, A., Hu, Y., Acharki, S., Buttar, N. A., Ray, R. L., Khaliq, A., Zubair, N., Zubair, M., Syed, N. R., & Elbeltagi, A. (2023). *Evapotranspiration Importance in Water Resources Management Through Cutting-Edge Approaches of Remote Sensing and Machine Learning Algorithms BT - Surface and Groundwater Resources Development and Management in Semi-arid Region: Strategies and Solutions* (C. B. Pande, M. Kumar, & N. L. Kushwaha (eds.); pp. 1–20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29394-8_1
- Riddick, E. W. (2022). Topical Collection : Natural Enemies and Biological Control of Plant Pests. *Insects*, 421(13), 13–15.
- Roby, T. J., & Kallarackal, J. (2017). Estimation of evapotranspiration in a tropical wildlife sanctuary using GIS and remote sensing techniques. *Forest Res Eng Int J*, 1(3), 13.
- Rosa-Diaz, I., Rowe, J., Cayuela-Lopez, A., Arbona, V., Díaz, I., & Jones, A. M. (2024). Spider mite herbivory induces an ABA-driven stomatal defense. *Plant Physiology*, 195(4), 2970–2984. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae215>
- Rowlandson, T., Gleason, M., Sentelhas, P., Gillespie, T., Thomas, C., & Hornbuckle, B. (2015). Reconsidering Leaf Wetness Duration Determination for Plant Disease Management. *Plant Disease*, 99(3), 310–319. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE>
- Roy, S., Hoque, A., Saikia, P., & Padhiary, M. (2025). Climate-Smart Agriculture: AI-Based Solutions for Enhancing Crop Resilience and Reducing Environmental Impact. *Asian Research Journal of Agriculture*, 18(1), 291–310. <https://doi.org/10.9734/arja/2025/v18i1665>
- Sabir, R. M., Jawad, S., Ali, F., Mahmood, M. H., Tanveer, H., Shoaib, M., Quddos, Z., Arif, M., Azam, S., Nawaz, N., & Muhammad, N. (2025). AI in Sustainable Farming Revolutionizing Precision Agriculture. In G. J & M. R (Eds.), *AI and Ecological Change for Sustainable Development* (pp. 441–472). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0680-3.ch015>
- Santri, I. P., Adawiyah, R., & Ramadhani, P. (2025). Pengaruh Perlakuan pada Daun dan Batang Terhadap Laju Evapotranspirasi pada Tanaman Waru (*Hibiscus Tiliaceus*) dan Pinus (*Pinus Merkusii*). *Mesada: Journal of Innovative Research*, 1(2 SE-Articles), 231–238. <https://doi.org/10.61253/vvaf7n59>
- Senior, R. A., Hill, J. K., Benedick, S., & Edwards, D. P. (2018). Tropical forests are thermally buffered despite intensive selective logging. *Global Change Biology*, 24(3), 1267–1278. <https://doi.org/10.1111/gcb.13914>
- Sharma, S. (2023). Cultivating Sustainable Solutions: Integrated Pest Management (Ipm) for Safer and Greener Agronomy. *Corporate Sustainable Management Journal*, 1(2), 103–108. <https://doi.org/10.26480/csmj.02.2023.103.108>
- Shruthi, M. R., & Anil, K. K. N. (2025). AI-Driven Techniques for Real-Time Crop Monitoring in Smart Agriculture. *International Journal Of Scientific Research In Engineering And Management*, 09(08), 1–9. <https://doi.org/10.55041/IJSREM51797>
- Sikka, A. K., Islam, A., & Rao, K. V. (2018). Climate-Smart Land and Water Management for Sustainable Agriculture. *Irrigation and Drainage*, 67(1), 72–81. <https://doi.org/10.1002/ird.2162>
- Singh, S., Reddy, K. S., Bhowmick, M. K., Srivastava, A. K., Kumar, S., & Peramaiyan, P. (2025). *Accelerating Climate Adaptation with Big Data Analytics and ICTs BT - Advances in Agri-Food Systems: Volume I* (H. Pathak, W. S. Lakra, A. Gopalakrishnan, & K. C. Bansal (eds.); pp. 179–196). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0759-4_10
- Small, E. E., Badger, A. M., Abolafia-Rosenzweig, R., & Livneh, B. (2018). Estimating Soil Evaporation Using Drying Rates Determined from Satellite-Based Soil Moisture Records. In *Remote Sensing* (Vol. 10, Issue 12, p. 1945). <https://doi.org/10.3390/rs10121945>
- Ulina, E. S., & Hasibuan, M. (2024). Manipulating the community structure of arthropods in rice fields with floral resources plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1377(1), 12107. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1377/1/012107>
- Vala, Y., Sekhar, M., Sudeepthi, B., Thriveni, V., Lallawmkimi, M. C., Ranjith, R., & Reddy, S. E. (2024). A Review on Influence of Climate

- Change on Agronomic Practices and Crop Adaptation Strategies. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(10 SE-Review Article), 671–686. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i102991>
- Wang, S., Zhang, Q., Yue, P., & Wang, J. (2020). Effects of evapotranspiration and precipitation on dryness/wetness changes in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1027–1038. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03336-8>
- Wei, Z., Yoshimura, K., Wang, L., Miralles, D. G., Jasechko, S., & Lee, X. (2017). Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration. *Geophysical Research Letters*, 44(6), 2792–2801. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016GL072235>
- Wilkin, K. M., Ackerly, D. D., & Stephens, S. L. (2016). Climate Change Refugia, Fire Ecology and Management. *Forests*, 7(4), 77. <https://doi.org/10.3390/f7040077>
- Xing, W., Wang, W., Shao, Q., Song, L., & Cao, M. (2021). Estimation of Evapotranspiration and Its Components across China Based on a Modified Priestley–Taylor Algorithm Using Monthly Multi-Layer Soil Moisture Data. *Remote Sensing*, 13(16), 3118. <https://doi.org/10.3390/rs13163118>
- Xu, H., Chen, H., Qian, C., & Li, J. (2024). The Evapotranspiration Characteristics and Evaporative Cooling Effects of Different Vegetation Types on an Intensive Green Roof: Dynamic Performance Under Different Weather Conditions. *Sustainability*, 16(10812).
- Yang, Z., Jiang, Y., Qiu, R., Gong, X., Agathokleous, E., Hu, W., & Clothier, B. (2023). Heat stress decreased transpiration but increased evapotranspiration in gerbera. *Frontiers in Plant Science*, 14(January), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1119076>
- Yasuda, S., Shinozawa, A., Hirase, T., Weng, Y., Ishizak, H., Suzuki, R., Ueda, S., Sk, R., Yotsui, I., Toyota, M., Okamoto, M., Saijo, Y., Okamoto, M., Rajendram, A., Hirase, T., Ishizaki, H., Suzuki, R., Ueda, S., Sk, R., ... Saijo, Y. (2025). Humidity-driven ABA depletion determines plant-pathogen competition for leaf water. *BioRxiv*, 1–37. <https://doi.org/10.1101/2025.01.04.631318>
- Yusuf, A. G., Al-Yahya, F. A., Saleh, A. A., & Abdel-Ghany, A. M. (2025). Optimizing greenhouse microclimate for plant pathology: challenges and cooling solutions for pathogen control in arid regions. *Frontiers in Plant Science*, 16(February), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1492760>
- Zhang, D., Zhou, X., Zhang, J., Lan, Y., Xu, C., & Liang, D. (2018). Detection of rice sheath blight using an unmanned aerial system with high-resolution color and multispectral imaging. *PLOS ONE*, 13(5), e0187470. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187470>
- Zhang, H., Zhao, T., Ji, R., Chang, S., Gao, Q., & Zhang, G. (2023). The Decreased Availability of Soil Moisture and Canopy Conductance Dominate Evapotranspiration in a Rain-Fed Maize Ecosystem in Northeastern China. *Agronomy*, 13(12), 2941. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122941>
- Zhang, K., Kimball, J. S., & Running, S. W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3, 834–853. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>
- Zhao, T. (2023). Advances in plant immunity and disease resistance breeding. *Second International Conference on Biological Engineering and Medical Science (ICBioMed 2022)*, 12611, 62. <https://doi.org/10.1117/12.2669038>
- Zhou, L., Zhang, L., Liu, Q., Chen, Y., He, Z., Li, S., & Ma, X. (2025). Effects of Canopy Litter Removal on Canopy Structure, Understory Light and Vegetation Dynamics in Cunninghamia lanceolata Plantations of Varying Densities. *Plants*, 14(3144), 1–19.
- Zhuang, Q., Wang, H., & Xu, Y. (2020). Comparison of Remote Sensing based Multi-Source ET Models over Cropland in a Semi-Humid Region of China. *Atmosphere*, 11(4), 325. <https://doi.org/10.3390/atmos11040325>
- Zidan, F., & Febriyanti, D. E. (2024). Optimizing Agricultural Yields with Artificial Intelligence-Based Climate Adaptation Strategies. *IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI)*, 5(2), 136–147.