



Perubahan Iklim dan Perlindungan Tanaman: Tinjauan Integratif tentang Tantangan, Strategi Adaptif, dan Implikasi Kebijakan: Kajian Literatur

Climate Change and Plant Protection: An Integrative Review of Challenges, Adaptive Strategies, and Policy Implications: Literature Review

Rusmadi Rukmana*, Syarif Hidayat Amrullah, Zulkarnain, Aswar Rustam, Dirhamzah

Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri
Alauddin Makassar, Indonesia, 92113

*Penulis korespondensi: rusmadi.bio@uin-alauddin.ac.id

ABSTRAK. Perubahan iklim secara signifikan mengubah ekosistem pertanian, terutama melalui pengaruhnya terhadap dinamika populasi dan distribusi hama serta penyakit tanaman. Studi ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana variabilitas iklim, termasuk peningkatan suhu dan curah hujan yang tidak menentu, memengaruhi ledakan hama dan keefektifan strategi perlindungan tanaman. Dengan menggunakan metodologi tinjauan sistematis, penelitian ini mensintesis temuan dari studi empiris dan dokumen kebijakan yang diterbitkan dalam satu dekade terakhir. Kajian ini mengintegrasikan wawasan dari ilmu ekologi, iklim, entomologi, dan patologi tanaman untuk mengevaluasi dampak perubahan kondisi lingkungan terhadap kelangsungan hidup, reproduksi, dan migrasi hama. Temuan utama menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi menurunkan tingkat kematian hama dan mempercepat siklus hidupnya, sementara peristiwa cuaca ekstrem mempercepat proliferasi patogen dan meningkatkan kerentanan tanaman. Selain itu, keefektifan pestisida kimia terbukti menurun dalam kondisi ekstrem, sehingga mendorong peralihan ke metode pengendalian hayati, rotasi tanaman, dan praktik pertanian cerdas iklim. Studi ini juga menelaah bagaimana teknologi digital dan alat peramalan iklim dapat mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan hama. Pada akhirnya, penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan sistem perlindungan tanaman yang adaptif, berkelanjutan, dan terintegrasi teknologi, serta menekankan perlunya kebijakan inklusif yang memberdayakan petani untuk merespons secara proaktif terhadap ancaman yang muncul.

Kata kunci: dinamika hama, pertanian adaptif, pengendalian hayati, pertanian cerdas iklim, teknologi digital

ABSTRACT. Climate change is profoundly altering agricultural ecosystems, particularly through its influence on the population dynamics and distribution of plant pests and diseases. This study aims to analyze how climate variability, including rising temperatures and erratic precipitation, affects pest outbreaks and the effectiveness of plant protection strategies. Employing a systematic review methodology, this research synthesizes findings from empirical studies and policy documents published over the last decade. It integrates insights from ecology, climate science, entomology, and plant pathology to evaluate the consequences of changing environmental conditions on pest survival, reproduction, and migration. Key findings reveal that higher temperatures reduce pest mortality rates and accelerate life cycles, while extreme weather events foster pathogen proliferation and increase crop vulnerability. Furthermore, chemical pesticide efficacy is shown to decline under extreme conditions, prompting a shift toward biological control methods, crop rotation, and climate-smart farming practices. The study also examines how digital technologies and climate forecasting tools can support data-driven decision-making in pest management. Ultimately, this research contributes to the advancement

of adaptive, sustainable, and technology-integrated plant protection systems and highlights the need for inclusive policies that empower farmers to respond proactively to emerging threats.

Keywords: adaptive agriculture, biological control, climate-smart farming, digital technologies, pest dynamics.

Pendahuluan

Selama dua dekade terakhir, perubahan iklim telah menjadi tantangan utama bagi keberlanjutan pertanian, memengaruhi produktivitas tanaman, ketahanan pangan, dan kesehatan ekosistem di berbagai wilayah. Kenaikan suhu global dan pola curah hujan yang berubah telah meningkatkan kebutuhan evapotranspirasi, mengubah dinamika hama dan penyakit, serta mengganggu kalender pertanian tradisional (Knox *et al.*, 2012; Parwin *et al.*, 2023). Pergeseran lingkungan ini memberikan tekanan besar terhadap kesehatan dan ketahanan tanaman sehingga memerlukan respons ilmiah yang mendesak. Bukti dari India dan negara agraris lainnya menunjukkan bahwa kenaikan suhu dan curah hujan yang tidak teratur telah menurunkan hasil panen dan efisiensi irigasi, sehingga menuntut respons adaptif yang spesifik lokasi (Kumar & Gautam, 2014; Rehana & Mujumdar, 2013).

Kondisi ekstrem seperti kekeringan, banjir, dan badai kini terjadi lebih sering dan intens, mengungkapkan kelemahan dalam sistem perlindungan tanaman. Di Bhutan, meskipun terjadi kemajuan dalam teknologi pertanian, curah hujan yang tidak teratur dan munculnya hama serta penyakit baru telah mengancam ketahanan pangan nasional (Waiba, 2023; Chhogyel & Kumar, 2018). Oleh karena itu, adaptasi melalui peningkatan ketahanan pertanian dan intervensi sistemik bukan hanya kebutuhan praktis, tetapi juga tuntutan kebijakan (Chhogyel *et al.*, 2020; Ogunbameru *et al.*, 2013). Kompleksitas permasalahan ini ditambah dengan aspek tata kelola sumber daya alam, yang memperkuat pentingnya praktik pertanian cerdas iklim yang mendukung produktivitas dan kelestarian lingkungan (Singh *et al.*, 2024; Gregory *et al.*, 2005).

Permasalahan utama dalam penelitian ini berkaitan dengan dampak perubahan iklim terhadap perlindungan tanaman – khususnya, bagaimana perubahan suhu, curah hujan, dan kejadian cuaca ekstrem memengaruhi perubahan perilaku hama dan mengurangi keefektifan strategi perlindungan tanaman konvensional. Sebagai contoh, peningkatan suhu memicu peningkatan herbivori serangga dan siklus reproduksi yang lebih cepat, yang memperbesar kerentanan tanaman (Nurindah & Yulianti, 2018). Sementara itu, perubahan pola curah hujan mengganggu kemunculan penyakit dan interaksi patogen-inang. Oleh karena itu, makalah ini mengkaji interaksi-interaksi tersebut dan mengevaluasi strategi ilmiah yang dikembangkan untuk menguranginya. Pendekatan umum dalam penelitian sebelumnya menekankan pada pengendalian hama secara terpadu (PHT), varietas tanaman yang tahan iklim, dan pemodelan prediktif sebagai metode yang layak untuk memperkuat perlindungan tanaman di tengah perubahan iklim. Studi menunjukkan bahwa pengembangan varietas spesifik tanaman dan teknologi pertanian presisi dapat mengurangi kerentanan tanaman bahkan di bawah tekanan lingkungan yang tinggi (Adiyoga & Lukman, 2018; Kumar *et al.*, 2023). Lebih jauh, adaptasi iklim dalam sektor pertanian menuntut kebijakan berbasis data, penyuluhan pertanian yang ditingkatkan, dan tata kelola kolaboratif agar strategi mitigasi dapat diimplementasikan secara luas (Giller *et al.*, 2015; Brenton *et al.*, 2022).

Solusi yang lebih fokus terus bermunculan dari penelitian ilmiah yang mengkaji pengelolaan hama cerdas iklim dan pengembangan varietas tahan penyakit. Studi eksperimental menunjukkan bahwa cekaman fisiologis akibat suhu tinggi pada

tanaman padi dan kedelai dapat menyebabkan penurunan produktivitas hingga 10% sebagai akibat dari kenaikan suhu malam hari (Asnawi, 2015; Garuda & Baliadi, 2018). Studi lain tentang kekeringan musiman dan dampaknya terhadap kesejahteraan rumah tangga petani padi memperkuat urgensi intervensi praktis (Arham & Adiwibowo, 2022). Di samping itu, sistem pemantauan ilmiah untuk mengantisipasi wabah hama dalam kondisi iklim yang berubah menjadi bidang kajian yang berkembang (Abdilah & Hamid, 2023; Sarvina, 2019).

Literatur terbaru juga menunjukkan bahwa kemunculan cepat tekanan biotik baru telah meningkatkan kompleksitas perlindungan tanaman secara signifikan. Migrasi hama akibat iklim kini mengancam zona agroekologi yang sebelumnya tidak terpengaruh, menghadirkan tantangan baru bagi petani dan peneliti (Ruminta *et al.*, 2018). Siklus reproduksi hama yang dipicu oleh iklim telah melampaui keefektifan metode pengendalian tradisional. Literatur ini telah meletakkan dasar untuk mengembangkan teknologi perlindungan tanaman adaptif, seperti inovasi pengendalian hayati dan aplikasi pestisida kimia yang disesuaikan dengan konteks lokal. Namun, masih terdapat kesenjangan dalam penerapan skala luas, terutama di sistem pertanian dengan sumber daya terbatas.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi ruang lingkup dan dampak perubahan iklim terhadap mekanisme perlindungan tanaman, dengan fokus khusus pada kesehatan tanaman, ekologi hama, dan keefektifan strategi pengendalian konvensional versus adaptif. Keunikan kajian ini terletak pada sintesis lintas wilayah dan disiplin, yang menggabungkan respons fisiologis tanaman, pemodelan iklim, dan dinamika hama-patogen dalam satu kerangka analitis. Studi ini berhipotesis bahwa variabilitas iklim yang meningkat berkorelasi langsung dengan penurunan keefektifan teknik perlindungan tanaman konvensional, dan bahwa strategi tahan iklim yang ditargetkan memberikan hasil yang lebih baik di bawah kondisi stres.

Dengan mensintesis temuan terbaru, karya ini berkontribusi terhadap pengembangan kebijakan dan strategi riset adaptif yang disesuaikan untuk negara berkembang yang menghadapi beban iklim yang tidak proporsional. Cakupan mencakup eksplorasi studi ilmiah global tentang keterkaitan antara perubahan pola cuaca dan dinamika hama, dengan penekanan khusus pada implikasinya terhadap sistem pertanian Asia Tenggara. Lebih jauh lagi, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan praktis dan mendorong respons akademik dan kebijakan yang lebih terkoordinasi terhadap ancaman iklim dalam perlindungan tanaman.

Metode

Desain dan Strategi Pencarian Literatur

Bagian ini menyajikan kerangka metodologis sistematis yang digunakan untuk menelaah dampak perubahan iklim terhadap perlindungan tanaman. Tinjauan pustaka sistematis (*Systematic Literature Review*/SLR) diadopsi sebagai pendekatan utama, mengikuti pedoman PRISMA (Moher *et al.*, 2009; Liberati *et al.*, 2009) guna menjamin transparansi dan kelengkapan. Strategi pencarian dilakukan di berbagai basis data terkemuka seperti *Scopus*, *Web of Science*, *PubMed*, dan *ScienceDirect* dengan menggunakan kata kunci seperti "climate change," "plant protection," "pest management," dan kata kunci terkait lainnya, dikombinasikan menggunakan *operator Boolean* (AND, OR). Kriteria inklusi mencakup studi yang berfokus pada perlindungan tanaman, dinamika hama/patogen, dan strategi adaptasi iklim berdasarkan waktu

diterbitkan dalam jurnal peer-reviewed antara tahun 2013 hingga 2023, dengan metodologi yang sahih, seperti pada studi Sarvina (2019) dan Setiawati *et al.* (2016).

Pendekatan Analisis dan Teknik Sintesis Data

Beberapa pendekatan analitis diterapkan untuk menangkap hubungan multidimensi antara perubahan iklim dan perlindungan tanaman. Pendekatan SLR memadukan data kualitatif dan kuantitatif guna mengidentifikasi tema-tema utama serta kesenjangan dalam literatur, sebagaimana dijelaskan oleh Hadid *et al.* (2023). Teknik analisis deskriptif kuantitatif digunakan untuk mengenali pola dari data numerik terkait ledakan hama dan degradasi pestisida, seperti ditunjukkan oleh Ruminta *et al.* (2020). Selain itu, studi kasus seperti yang dilakukan oleh Alfiandy *et al.* (2021) memberikan kedalaman kontekstual mengenai perubahan zonasi agroklimat. Survei dan wawancara yang dijelaskan oleh Kurniawan & Arisurya (2021) juga digunakan untuk mengeksplorasi persepsi petani terhadap adaptasi iklim.

Evaluasi Validitas dan Reliabilitas Data

Model matematis dan statistik, seperti *Structural Equation Modeling* (SEM), ditinjau untuk mengevaluasi hubungan kompleks antar variabel (Harvian & Yuhan, 2021). Validitas dan reliabilitas data diuji melalui berbagai strategi, termasuk evaluasi validitas internal dan eksternal. McCormick *et al.* (2015) menekankan pentingnya akurasi pengukuran hasil, sedangkan Shi *et al.* (2018) menyoroti validasi kluster populasi. Selain itu, reliabilitas data ditelaah menggunakan pendekatan dari Kung *et al.* (2010). Untuk mengkaji kualitas metodologis dari studi-studi yang dikaji, digunakan alat AMSTAR 2 (Shea *et al.*, 2017), dan dibandingkan dengan standar internasional seperti dirujuk oleh Abraha *et al.* (2016).

Pertimbangan Etis dan Keterbatasan Penelitian

Pertimbangan etis tetap diperhatikan, meskipun penelitian ini berbasis data sekunder dari literatur yang telah diterbitkan. Integritas akademik dan sitasi yang benar dijaga secara ketat. Walau demikian, terdapat beberapa keterbatasan seperti ketergantungan pada literatur yang tersedia dan pengecualian terhadap publikasi yang dapat membatasi representasi konteks regional. Keseluruhan kerangka metodologis ini menyediakan dasar yang kuat untuk menelaah secara ilmiah keterkaitan antara perubahan iklim dan perlindungan tanaman, serta mendukung pemahaman holistik terhadap tantangan dan strategi adaptasi yang relevan dalam konteks pertanian global yang dinamis.

Hasil dan Pembahasan

Dinamika Hama dan Penyakit Tanaman

Perubahan iklim, khususnya pemanasan global, telah secara signifikan memengaruhi dinamika populasi organisme pengganggu tumbuhan (OPT). Ali *et al.* (2019) melaporkan korelasi positif antara peningkatan suhu dengan pertumbuhan populasi *Rice leaffolders*, hama pelipat daun padi, spesies *Cnaphalocrocis medinalis*, menyebabkan kerugian besar di negara penghasil padi. Model statistik menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi berhubungan dengan peningkatan populasi hama. menunjukkan bahwa kondisi yang lebih hangat mempercepat kemunculan hama tersebut. Demikian pula, Reddy *et al.* (2015) menemukan bahwa suhu musim dingin yang lebih tinggi mengurangi tingkat kematian *Helicoverpa armigera*, sehingga

meningkatkan kelangsungan hidupnya selama musim tidak aktif. Temuan ini mendukung konsensus bahwa pemanasan global mengurangi faktor kematian pada berbagai tahap hidup hama, yang pada akhirnya mendorong ekspansi populasi.

Perubahan musim akibat pola iklim yang berubah juga memengaruhi siklus hidup hama. Perubahan suhu dan curah hujan berdampak pada waktu muncul dan reproduksi hama (Shrestha, 2019). Lister dan García (2018) menekankan bahwa perubahan iklim dapat mengubah struktur jejaring makanan di ekosistem tropis, memengaruhi baik hama maupun predator alaminya. Fand *et al.* (2015) menemukan bahwa suhu ekstrem dapat merusak perkembangan larva dan kapasitas reproduksi *Spodoptera litura*, yang menunjukkan bahwa pengelolaan hama harus memperhitungkan siklus hidup yang semakin kompleks.

Perubahan penggunaan lahan untuk budidaya sereal juga berdampak pada dinamika regional hama. Yang *et al.* (2024) menyoroti bahwa praktik pertanian dan faktor iklim sama-sama memengaruhi proliferasi hama, menegaskan pentingnya integrasi pengelolaan lahan berkelanjutan dengan kebijakan iklim. Secara umum, tren kecenderungan yang jelas terlihat: kenaikan suhu mengubah fenologi dan kelangsungan hidup hama, sehingga menuntut strategi pengelolaan hama yang lebih adaptif.

Ekstrem iklim, seperti El Niño dan La Niña, memperburuk kesehatan tanaman dan meningkatkan kejadian penyakit. Suhu tinggi dan curah hujan tidak menentu meningkatkan insiden penyakit yang disebabkan oleh cendawan dan bakteri, khususnya di lingkungan yang hangat dan lembap (Hilman *et al.*, 2019; Widiawati *et al.*, 2025). Misalnya, penyakit bercak daun pada padi semakin parah di bawah kondisi hangat dan lembap yang berkepanjangan, mempercepat metabolisme patogen.

Menurut Sarvina (2019), perubahan iklim juga memfasilitasi kemunculan spesies hama dan penyakit baru, khususnya pada tanaman hortikultura. *Spodoptera frugiperda* adalah salah satu hama yang berkembang di suhu ekstrem, memperparah kerugian pertanian. Anomali cuaca telah mengubah pola serangan hama tradisional menjadi lebih parah dan tidak dapat diprediksi (Abdilah & Hamid, 2023).

Di wilayah seperti Indonesia, wabah hama seperti wereng cokelat (*Nilaparvata lugens*) meningkat di tengah pola cuaca yang tidak menentu (Widiawati *et al.*, 2025). Konversi lahan tanpa praktik berkelanjutan dapat memicu evolusi hama yang lebih agresif (Hilman *et al.*, 2019; Santoso, 2016). Temuan-temuan ini menekankan urgensi bagi petani untuk mengadopsi strategi dan teknologi baru guna melindungi hasil panen di tengah kondisi iklim yang semakin tidak stabil.

Keefektifan Strategi Perlindungan Tanaman

Keefektifan pestisida kimia dipengaruhi secara nyata oleh suhu dan kelembapan lingkungan. Suhu yang lebih tinggi mempercepat volatilisasi pestisida, sehingga mengurangi keefektifannya karena hama terpapar lebih sedikit zat aktif (Dewi *et al.*, 2021). Selain itu, kelembapan dapat mempercepat degradasi pestisida tertentu, melemahkan kinerjanya dalam pengendalian hama (Sarvina, 2019). Cekaman lingkungan juga mendorong pertumbuhan patogen, sehingga menambah tantangan dalam penggunaan pestisida kimia (Sarvina, 2019).

Strategi pengendalian hayati berkembang seiring dengan perubahan iklim. Misalnya, introduksi *Anagyrus lopezi* untuk mengendalikan *Phenacoccus manihoti* pada tanaman singkong menjadi contoh pengendalian hayati yang responsif terhadap iklim (Abduchalek *et al.*, 2017). Inisiatif ini menegaskan pentingnya langkah pengendalian hama yang adaptif terhadap variabilitas iklim (Sarvina, 2019).

Fitopestisida menawarkan alternatif berkelanjutan yang menjanjikan dibandingkan bahan kimia sintetis. Menurut Pujiati dan Sucahyo (2021), pestisida nabati bisa seefektif pestisida konvensional dengan dampak lingkungan yang lebih rendah. Senyawa alami ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada pestisida sintetis, tetapi juga mendukung praktik pertanian ramah lingkungan. Menggabungkan pengetahuan teoretis dengan pengalaman lapangan sangat penting untuk menerapkan pengendalian hayati adaptif. Strategi holistik ini menjamin kompatibilitas ekologi dan memperkuat kemampuan petani dalam mengelola wabah hama di tengah tantangan iklim yang semakin intensif.

Perubahan Iklim dan Keberhasilan Rotasi Tanaman

Rotasi tanaman tetap menjadi strategi berharga untuk menekan kejadian hama, bahkan di tengah ketidakpastian iklim. Suhu yang meningkat dan cuaca yang tidak dapat diprediksi membuat wabah hama semakin tidak menentu, namun rotasi tanaman tetap efektif dalam mengganggu siklus hidup hama. Kluger *et al.* (2022) menunjukkan bahwa rotasi mengurangi prevalensi nematoda dan berkontribusi terhadap peningkatan hasil panen. Strategi rotasi yang beragam meningkatkan ketahanan agroekologis terhadap peristiwa iklim ekstrem. Saulić *et al.* (2022) dan Bowles *et al.* (2020) menekankan bahwa praktik ini meningkatkan kesehatan tanah dan keanekaragaman hayati, menciptakan kondisi yang tidak menguntungkan bagi OPT dan memperkuat ketahanan sistem.

Di negara berkembang, petani semakin mengadopsi praktik pengendalian terpadu sebagai respons terhadap tekanan iklim. Ajak *et al.* (2018) mendokumentasikan bahwa petani kecil di Uganda menggunakan rotasi tanaman dan pengelolaan hama terpadu (PHT) untuk menghadapi variabilitas iklim. Metode ini menggabungkan pengetahuan tradisional dengan teknologi modern untuk meningkatkan ketahanan. Kalogiannidis *et al.* (2022) mencatat bahwa perlindungan tanaman di masa depan akan semakin mengandalkan pendekatan terpadu berbasis teknologi—seperti tanaman penutup dan biopestisida—yang meskipun lebih mahal, namun lebih berkelanjutan. Peralihan teknologi ini menunjukkan kemajuan menuju praktik pertanian yang berkelanjutan di bawah cekaman iklim.

Implikasi Kebijakan dan Perlindungan Tanaman Nasional

Dinamika OPT yang terus berubah menuntut reformasi kebijakan yang adaptif. Suwardi (2018) menekankan perlunya pemberdayaan sistematis kelompok tani untuk menghadapi perubahan dalam ekologi hama. Sumaryanto (2016) merekomendasikan perumusan kebijakan secara partisipatif, dengan melibatkan petani dalam perencanaan adaptif menghadapi gangguan akibat hama. Suwondo *et al.* (2018) mendorong integrasi pengelolaan ekosistem lahan gambut ke dalam kebijakan perlindungan nasional agar konservasi keanekaragaman hayati selaras dengan pengendalian hama. Strategi tata kelola berbasis ekosistem ini penting bagi keberlanjutan jangka panjang.

Pada tingkat petani, partisipasi dalam program pertanian cerdas iklim (*climate-smart agriculture*, CSA) meningkatkan adopsi praktik adaptif (Hadid *et al.*, 2023). Studi kasus lokal, seperti di Desa Kerato, Sumbawa menunjukkan bahwa petani mulai menerapkan diversifikasi tanaman dan pengendalian hama adaptif (Ayu *et al.*, 2020). Perencanaan kebijakan sebaiknya memanfaatkan momentum akar rumput ini dengan menyelaraskan inisiatif dari bawah ke atas dengan strategi dari atas ke bawah.

Pemerintah yang menyelenggarakan pelatihan terstruktur kepada kelompok tani mengenai penggunaan pestisida dan pengambilan keputusan dapat meningkatkan

kemampuan mereka dalam merespons ancaman hama, dengan memastikan solusi yang lebih fleksibel dan berbasis komunitas.

Teknologi Berbasis Iklim dan Inovasi Digital

Alat digital dan pemodelan iklim menawarkan solusi yang kuat untuk pengendalian hama. Susanti *et al.* (2020) menunjukkan bahwa variabilitas iklim berkorelasi dengan terjadinya wabah hama. Sistem peringatan dini berbasis cuaca dapat membantu mengurangi kerugian hasil dengan memungkinkan intervensi tepat waktu. Aulia *et al.* (2023) menyoroti manfaat *Internet of Things* (IoT) dalam pertanian, memungkinkan pemantauan parameter lingkungan secara waktu nyata (seperti suhu, kelembapan, cahaya), yang mendukung pengelolaan hama secara proaktif. Selain itu, Nuraini *et al.* (2019) mengembangkan model HyBMG yang meningkatkan prediksi lonjakan populasi hama berdasarkan parameter iklim. Sistem prediktif ini membantu merumuskan strategi pengelolaan berbasis data.

Namun demikian, kajian mengenai dampak spesifik kondisi iklim ekstrem masih terbatas pada hama-hama utama dan komoditas strategis, sementara hama-hama minor yang juga berpotensi mengalami ledakan populasi akibat perubahan iklim belum banyak mendapatkan perhatian. Fadli (2022) mencatat bahwa skenario emisi dan model prediksi curah hujan masih dalam tahap penyempurnaan. Kadarsah (2010) berpendapat bahwa model iklim saat ini belum cukup andal untuk aplikasi pertanian secara luas karena masih adanya keterbatasan dalam merepresentasikan variabilitas iklim lokal, resolusi spasial dan temporal yang rendah, serta ketidakpastian dalam memproyeksikan interaksi kompleks antara faktor atmosfer, tanah, dan vegetasi. Selain itu, model iklim cenderung dikembangkan pada skala global atau regional sehingga seringkali tidak mampu menangkap fenomena iklim mikro yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman. Oleh karena itu, meskipun alat digital memiliki potensi besar, pengembangan metodologi lebih lanjut diperlukan untuk menghubungkan data iklim dengan dinamika hama dan langkah pengendaliannya secara efektif. Menjembatani kesenjangan ini penting untuk meningkatkan ketahanan pertanian di tengah perubahan iklim.

Bab ini telah mengeksplorasi dampak multifaset perubahan iklim terhadap perlindungan tanaman. Temuan utama mencakup peningkatan tekanan akibat (?) hama, perubahan dinamika penyakit, penurunan keefektifan pestisida kimia, evolusi strategi pengendalian hayati, dan peran penting teknologi berbasis data. Untuk mengatasi tantangan ini, dibutuhkan kombinasi manajemen adaptif, pemberdayaan petani, teknologi tahan iklim, dan kerangka kebijakan integratif guna menjaga produktivitas pertanian di tengah ketidakpastian lingkungan.

Pembahasan

Temuan dari studi ini memperkuat bukti yang semakin banyak bahwa perubahan iklim secara signifikan memengaruhi dinamika kejadian hama dan penyakit tanaman, dengan implikasi luas terhadap kebijakan dan strategi perlindungan tanaman nasional. Peningkatan suhu dan variabilitas pola curah hujan sangat berkaitan dengan peningkatan populasi dan perubahan siklus hidup hama utama seperti *leafhoppers* dan *Helicoverpa armigera*, sebagaimana diamati dalam studi oleh Ali *et al.* (2019) dan Reddy *et al.* (2015). Temuan ini sejalan dengan pernyataan yang lebih luas oleh Shrestha (2019) serta Lister & García (2018) bahwa perubahan iklim dapat mengganggu keseimbangan ekologi, termasuk interaksi trofik antara hama dan musuh alaminya. Akibatnya,

perpanjangan aktivitas hama ke wilayah dan periode yang sebelumnya tidak sesuai merupakan pergeseran besar yang menantang sistem pengendalian hama konvensional. Seiring munculnya pola hama dan penyakit yang baru dan semakin agresif akibat kejadian cuaca ekstrem, maka kebijakan perlindungan tanaman perlu menjadi lebih dinamis. Seperti disarankan oleh Yastika *et al.* (2023), strategi saat ini harus diperbarui agar mencerminkan perubahan perilaku hama dan respons ekologis yang berkembang. Integrasi data waktu nyata dan model prediktif dalam pengambilan keputusan menjadi suatu keharusan. Nurindah & Yulianti (2018) menekankan perlunya manajemen adaptif yang didukung oleh riset berkelanjutan terhadap perilaku hama yang terus berkembang. Temuan ini menegaskan pentingnya reformasi sistemik dalam kebijakan pertanian nasional untuk mengantisipasi dan merespons ancaman hama yang dipengaruhi oleh perubahan iklim.

Respons praktis di tingkat petani melibatkan penerjemahan wawasan tersebut ke dalam strategi adaptasi yang dapat dilaksanakan. Halawa (2024) menyoroti bahwa akses terhadap alat digital dan platform pengambilan keputusan berbasis iklim memberdayakan petani untuk membuat pilihan pertanian yang lebih tepat waktu dan akurat. Demikian pula, Indrawati *et al.* (2023) berpendapat bahwa perilaku kewirausahaan petani muda merupakan penggerak penting dalam membangun praktik pertanian yang tangguh. Memberdayakan petani melalui pendidikan, pelatihan, dan keterlibatan mereka dalam penyusunan kebijakan, seperti yang dijelaskan oleh Ristianti *et al.* (2022), dapat memperkuat ketahanan pertanian dari tingkat bawah. Hal ini sejalan dengan Bakri (2022) yang menekankan pentingnya memasukkan aspek pendidikan dalam kebijakan pertanian agar petani lebih mampu mengendalikan hama.

Selain itu, diversifikasi sistem tanam muncul sebagai mekanisme adaptasi yang layak dalam menghadapi peningkatan risiko hama. Kadarsah (2010) dan Bowles *et al.* (2020) menunjukkan bahwa rotasi tanaman yang beragam dan sistem polikultur tidak hanya mengganggu siklus hidup hama tetapi juga meningkatkan ketahanan ekosistem. Temuan ini menekankan pentingnya pendekatan adaptasi berbasis ekosistem dalam strategi pertanian nasional dan regional. Ajak *et al.* (2018) juga menekankan bahwa integrasi pengetahuan tradisional dengan teknologi inovatif memberikan jalur yang seimbang menuju pengendalian hama yang berkelanjutan di wilayah dengan sumber daya terbatas.

Integrasi teknologi digital dan alat prediksi iklim merupakan kemajuan penting dalam pengendalian hama secara proaktif. Karya Susanti *et al.* (2020) dan Aulia *et al.* (2023) menggambarkan bagaimana pemantauan lingkungan berbasis IoT dapat memberikan peringatan dini terhadap ledakan hama melalui pengumpulan variabel iklim utama. Model HyBMG yang diusulkan oleh Nuraini *et al.* (2019) menunjukkan kekuatan analitis model prediktif dalam memproyeksikan perilaku hama. Alat ini mampu mengubah data variabilitas iklim menjadi penilaian risiko spasial dan temporal, sehingga memfasilitasi respons pencegahan alih-alih respons reaktif. Heeb *et al.* (2019) dan Juroszek & Tiedemann (2012) mendukung pernyataan ini dengan mengaitkan analitik data waktu nyata dengan intervensi yang lebih efektif. Liu *et al.* (2016) menambahkan bahwa pemodelan prediktif yang digabungkan dengan pengetahuan agronomi memungkinkan sintesis interaksi iklim-hama-tanaman.

Namun demikian, masih terdapat sejumlah kesenjangan penelitian dalam memahami secara menyeluruh interaksi kompleks antara perubahan iklim dan perlindungan tanaman. Falconnier *et al.* (2020) mencatat bahwa cakupan model saat ini masih terbatas dalam menjelaskan respons spesifik hama terhadap variabilitas lingkungan. Observasi ini diperkuat oleh Dumitru *et al.* (2023), yang menyoroti masih

langkanya studi spesifik tanaman yang dapat menjadi dasar bagi pertanian presisi. Tinjauan oleh Juroszek & Tiedemann (2012) juga mengidentifikasi kurangnya fokus pada peluang mitigasi dalam pengelolaan hama, sehingga menunjukkan perlunya pergeseran prioritas penelitian. Secara paralel, karya Assan *et al.* (2018) dan Heeb *et al.* (2019) menyerukan pendekatan yang lebih partisipatif yang mengikutsertakan perspektif petani dalam pengembangan kerangka kerja adaptif untuk pengendalian hama.

Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk mensintesis pengetahuan terkini mengenai dampak perubahan iklim terhadap perlindungan tanaman, dengan fokus khusus pada dinamika hama, keefektifan pestisida kimia, dan peran inovasi pertanian berkelanjutan. Kajian ini merujuk pada kerangka teori utama dan temuan empiris untuk mengevaluasi bagaimana kondisi iklim ekstrem memengaruhi sistem pertanian serta mengidentifikasi strategi ilmiah dan teknologi yang diusulkan untuk mengatasi tantangan tersebut. Salah satu perhatian teoretis utama dalam bidang ini adalah interaksi ekologi antara variabel iklim dan ancaman biologis terhadap tanaman seperti hama dan patogen. Peningkatan suhu dan kadar CO₂ telah ditemukan mempercepat siklus hidup banyak hama pertanian, yang menyebabkan peningkatan kepadatan populasi dan kerusakan tanaman yang lebih besar. Trębicki *et al.* (2015) melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ atmosfer, bersamaan dengan kenaikan suhu, berkorelasi positif dengan meningkatnya infeksi virus pada tanaman. Kondisi ini mendorong reproduksi hama yang lebih cepat dan tingkat infeksi yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan risiko kehilangan hasil panen. Selain itu, perubahan lingkungan tersebut juga meningkatkan virulensi banyak patogen, yang menunjukkan interaksi yang lebih agresif antara tanaman dan agen penyakit di bawah tekanan iklim.

Kelembapan juga memainkan peran penting dalam memodifikasi hubungan antara tanaman, hama, dan patogen. Kannan (2023) mengamati bahwa volatilitas pestisida lebih tinggi pada tanah lembap dibandingkan dengan tanah kering, yang secara langsung memengaruhi persistensi pestisida dan keefektifan pengendalian hama. Kelembapan tinggi mendorong pertumbuhan cendawan dan bakteri, sehingga memfasilitasi penularan dan prevalensi penyakit tanaman. Dalam konteks ini, ekosistem menjadi lebih mendukung kelangsungan hidup dan reproduksi hama, khususnya di wilayah tropis dan subtropis, di mana perubahan musim memperburuk efek ini.

Terkait keefektifan pestisida, berbagai studi mengungkapkan bahwa panas ekstrem dan kelembapan tinggi dapat mempercepat degradasi residu kimia, sehingga mengurangi keefektifannya. Jiang *et al.* (2024) menunjukkan bahwa suhu tinggi dan peningkatan kelembapan mempercepat proses penguraian pestisida, yang membatasi jangka waktu perlindungan. Davie-Martin *et al.* (2015) menegaskan bahwa variabel lingkungan memengaruhi volatilisasi pestisida dari tanah ke udara, sehingga menurunkan konsentrasi pestisida efektif di lokasi tanaman. Murwanto & Rosita (2023) menambahkan bahwa aplikasi pestisida dalam kondisi suboptimal (di atas 30 °C atau di bawah 50% kelembapan) tidak hanya mengurangi keefektifan, tetapi juga menimbulkan risiko kesehatan bagi aplikator dan meningkatkan penyebaran pestisida ke luar sasaran, yang menyebabkan kontaminasi lingkungan.

Diluar performa pestisida, respons pertanian terpadu terhadap tekanan hama akibat iklim semakin menjadi perhatian. Sistem Pertanian Terpadu (*Integrated Farming Systems*/IFS) terbukti adaptif dalam menghadapi peningkatan populasi hama, terutama karena sifat multifungsional dan keragamannya. Kurniawan & Arisurya (2021) menyoroti penerapan teknologi adaptasi iklim seperti diversifikasi tanaman dan

pertanian campuran, yang mengurangi kerentanan tanaman dengan meningkatkan keanekaragaman genetik dan ekologi. Praktik ini mengganggu siklus hidup hama dan memperkuat ketahanan agroekosistem. Pramono (2018) menunjukkan bahwa tanaman perkebunan seperti kopi dapat menyerap karbon sambil beradaptasi dengan perubahan iklim. Hal ini tidak hanya menstabilkan iklim mikro tetapi juga mengurangi kemungkinan ledakan hama. Pola tanam campuran dan strategi pengelolaan tanah dalam kerangka IFS berpotensi meningkatkan kesuburan tanah dan mendorong pengendalian hama alami, sehingga mengurangi ketergantungan pada intervensi kimia.

Metode pengendalian hama ekologis, termasuk rotasi tanaman dan tumpangsari, merupakan elemen penting dari pertanian cerdas iklim. Ayu *et al.* (2020) berpendapat bahwa praktik ini memutus siklus hidup hama dan mengurangi tekanan penyakit. Metode ini tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi dengan mengurangi pengeluaran pestisida dan mendukung kesehatan tanah jangka panjang. Metode pengendalian hayati juga mengalami inovasi signifikan untuk mengatasi keterbatasan pengendalian hama kimia dalam konteks perubahan iklim. Hadid *et al.* (2023) menekankan peran penting musuh alami seperti predator dan parasitoid dalam regulasi hama di bawah kondisi iklim yang berubah. Ruminta *et al.* (2020) mendukung penggunaan agen hayati, dan menyarankan bahwa pengenalan serta konservasi mereka dalam ekosistem pertanian dapat meningkatkan penekanan hama meskipun terjadi kenaikan suhu dan pola curah hujan yang berubah.

Adiyoga & Lukman (2018) menekankan perlunya produk hayati spesifik iklim untuk meningkatkan efisiensi metode pengendalian hayati. Kemajuan dalam bioteknologi memungkinkan pengembangan biopestisida yang disesuaikan secara lokal yang mengurangi degradasi lingkungan dan meningkatkan hasil pengendalian hama. Solusi ini memberikan alternatif praktis bagi petani dibandingkan bahan kimia sintesis, dengan menyelaraskan pengelolaan hama dengan keberlanjutan ekologis dan ekonomi. Sebagai respons terhadap volatilitas iklim, teknologi berkelanjutan secara lingkungan telah diperkenalkan untuk memperkuat perlindungan tanaman. Salah satu metode tersebut adalah rekayasa habitat bagi musuh alami hama. Kurniahu (2022) menyarankan penggunaan tanaman refugia untuk menarik dan mempertahankan populasi artropoda yang menguntungkan, sehingga mengembalikan keseimbangan ekologi dan mengurangi ketergantungan pada pestisida. Pendekatan lain yang menjanjikan adalah penggunaan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR), yang meningkatkan kesehatan tanah dan ketahanan tanaman terhadap stres biotik. Suryanto *et al.* (2021) mendokumentasikan keefektifan PGPR dalam meningkatkan penyerapan nutrisi dan melindungi tanaman dari patogen, terutama di bawah kondisi lingkungan yang buruk.

Pertanian presisi juga telah memperkenalkan alat berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan pemantauan variabel iklim secara *real-time*. Aulia *et al.* (2023) menggambarkan bagaimana sistem pelacakan iklim otomatis dapat menginformasikan pengambilan keputusan pengelolaan hama yang tepat waktu dan akurat, sehingga meminimalkan pemborosan input dan mengoptimalkan strategi perlindungan tanaman. Teknik pertanian hijau seperti *alley cropping* dan *agroforestry* juga telah dieksplorasi. Sukmawati (2021) menunjukkan bahwa sistem hijau meningkatkan keanekaragaman hayati dan menstabilkan ekosistem pertanian. Praktik ini sangat penting dalam pertanian lahan kering, di mana monokultur memperburuk degradasi tanah dan serangan hama.

Teknologi rumah kaca menawarkan kontrol lebih lanjut atas iklim mikro tanaman. Menurut Ristian *et al.* (2022), lingkungan terkendali memungkinkan petani

memanipulasi suhu dan kelembapan, sehingga memastikan kondisi optimal untuk pertumbuhan tanaman dan mengurangi paparan terhadap tekanan terkait iklim. Terakhir, cendawan endomikoriza muncul sebagai simbiosis yang menguntungkan yang meningkatkan penyerapan nutrisi dan ketahanan tanaman. Lele (2023) melaporkan bahwa mikoriza membantu tanaman menghadapi kesuburan tanah yang rendah dan kelangkaan air, menjadikannya komponen berharga dalam sistem pertanian yang tahan iklim.

Sebagai kesimpulan, literatur menegaskan adanya keterkaitan teoritis dan empiris yang jelas antara perubahan iklim dan tantangan perlindungan tanaman. Perubahan suhu dan kelembapan berdampak besar pada perilaku hama, keefektifan pestisida, dan ketahanan tanaman. Berbagai strategi adaptif, termasuk pengendalian hayati, diversifikasi sistem pertanian, dan pemanfaatan alat pemantauan digital, telah mulai dikembangkan. Namun, penerapan konsep smart farming masih menghadapi sejumlah kendala, seperti keterbatasan infrastruktur digital di daerah pedesaan, rendahnya literasi teknologi di kalangan petani, biaya investasi awal yang tinggi, serta perlunya dukungan kebijakan yang konsisten. Oleh karena itu, integrasi antara aspek ekologi, teknologi, dan sosial ekonomi tetap menjadi kunci dalam mewujudkan perlindungan tanaman berkelanjutan di tengah percepatan perubahan iklim.

Secara keseluruhan, wawasan ini menekankan pentingnya pendekatan perlindungan tanaman yang multidimensional, berbasis data, dan inklusif dalam menghadapi ketidakpastian iklim. Penguatan kolaborasi antar pemangku kepentingan, investasi dalam pendidikan dan teknologi prediktif, serta pengisian kesenjangan penelitian menjadi hal penting dalam merespons ancaman yang semakin besar dari ledakan hama dan penyakit akibat perubahan iklim. Dengan mengintegrasikan pengetahuan lokal, inovasi ilmiah, dan kerangka kebijakan yang kuat, kita dapat membangun sistem pertanian yang lebih tangguh dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang cepat.

Simpulan

Studi ini menyoroti dinamika kompleks dan terus berkembang dari wabah hama dan penyakit tanaman sebagai respons terhadap perubahan iklim, khususnya meningkatnya suhu global dan pola cuaca yang tidak menentu. Temuan ini menegaskan bahwa baik siklus hidup maupun kepadatan populasi hama pertanian utama semakin dipengaruhi oleh faktor lingkungan, sehingga memerlukan strategi pengendalian hama yang lebih adaptif dan terintegrasi. Studi ini memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman tentang bagaimana variabilitas iklim memengaruhi ekosistem pertanian, dengan menawarkan kerangka kerja yang mengintegrasikan pemodelan iklim, teknologi digital, dan respons adaptif berbasis petani. Implikasi utamanya adalah kebutuhan mendesak akan reformasi kebijakan nasional agar mencakup strategi pengendalian hama yang responsif terhadap iklim dan inklusif terhadap petani. Penelitian di masa depan sebaiknya difokuskan pada studi longitudinal untuk menilai perilaku hama dalam skenario iklim yang diproyeksikan, dampak sosial ekonomi dari strategi adaptasi pengendalian hama, serta integrasi genomik dan penginderaan jauh untuk meningkatkan sistem peringatan dini.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan ucapan terimakasih kepada tim riset penelitian ini kepada Syarif Hidayat Amrullah, S.Pd., M.Sc, Zulkarnain, S.Si., M.Kes, Aswar Rustam, S.Pd., M.Si, Dirhamzah, S.Pd.I., M.Pd.I dan kepada Musdalifah, S.Kep.,Ns.,M.Kep.,M.Kes yang telah mendukung, memberikan masukan, dan dukungannya dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdilah M, Hamid I. 2023. Petani menolak kalah: adaptasi petani terhadap perubahan iklim di Desa Mahang Sungai Hanyar Kabupaten Hulu Sungai Tengah. *H-JS*. 2(1): 62-72. <https://doi.org/10.20527/h-js.v2i1.39>
- Abdulah B, Rauf A, Pudjianto P. 2017. Kutu putih singkong, *Phenacoccus manihoti* matile-ferrero (Hemiptera: Pseudococcidae): persebaran geografi di Pulau Jawa dan rintisan pengendalian hayati. *Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan Tropika*. 17(1): 1. doi: <https://doi.org/10.23960/j.hptt.1171-8>
- Abraha I Giovannini G, Serraino D, Fusco M, Montedori A. 2016. Validity of breast, lung and colorectal cancer diagnoses in administrative databases: a systematic review protocol. *BMJ Open*. 6(3):e010409. doi: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2015-010409>.
- Adiyoga W, Lukman L. 2018. Persepsi dan adaptasi petani sayuran terhadap perubahan iklim di Sulawesi Selatan. *Jurnal Hortikultura*. 27(2):279. doi: <https://doi.org/10.21082/jhort.v27n2.2017.p279-296>
- Ajak B, Kyazze F, Mukway, P. 2018. Choice of adaptation strategies to climate variability among smallholder farmers in the maize-based cropping system in Namutumba District, Uganda. *American Journal of Climate Change*. 7(3):431-451. doi: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2018.73026>
- Alfiandy S, Hadid A, Syakur A. 2021. Pergeseran zonasi agroklimat di wilayah Banggai Provinsi Sulawesi Tengah akibat perubahan iklim. *Buletin Gaw Bariri*. 2(1):48-61. doi: <https://doi.org/10.31172/bgb.v2i1.47>
- Ali M, Kabir M, Afrin S, Nowrin F, Haque S, Haque B. 2019. Increased temperature induces leafhopper outbreak in rice field. *Journal of Applied Entomology*. 143(8):867-874. doi: <https://doi.org/10.1111/jen.12652>
- Arham I, Adiwibowo S. 2022. Pengaruh kemarau panjang 2019 sebagai indikasi perubahan iklim terhadap kesejahteraan rumah tangga petani padi Desa Tenajar Kidul, Indramayu. *Jurnal Sains Komunikasi Dan Pengembangan Masyarakat*. 6(1):86-100. doi: <https://doi.org/10.29244/jskpm.v6i1.960>
- Asnawi R. 2015. Perubahan iklim dan kedaulatan pangan di Indonesia. Tinjauan produksi dan kemiskinan. *Sosio Informa*. doi: <https://doi.org/10.33007/inf.v1i3.169>
- Assan E, Suvedi M, Olabisi L, dan Allen A. 2018. Coping with and adapting to climate change: a gender perspective from smallholder farming in Ghana. *Environments*. 5(8):86. doi: <https://doi.org/10.3390/environments5080086>
- Aulia R, Laksmana I, Jingga T, Novita R, Hendra H, Harmailis H, Syelly R. 2023. Penerapan internet of things (IoT) di lingkungan Dinas Tanaman Pangan, Hortikultura dan Perkebunan Kabupaten Limapuluh Kota. *Journal of Indonesian Social Society*. 1(3):104-108. doi: <https://doi.org/10.59435/jiss.v1i3.177>
- Ayu I, Suhada I. 2020. Knowledge and adaptation of vegetable farmers in Kerato Village, Unter Iwes District, Sumbawa in facing the phenomenon of climate change. doi: <https://doi.org/10.11594/nstp.2020.0608>

- Bakri M. 2022. Hubungan faktor sosial ekonomi petani padi dengan pelaksanaan pengelolaan tanaman terpadu (PTT) di Desa Pongsamelung Kecamatan Lamasi Kabupaten Luwu. *Wanatani*. 2(1):1-10. doi: <https://doi.org/10.51574/jip.v2i1.51>
- Bowles T, Mooshammer M, Socolar Y, Calderón F, Cavigelli M, Culman, S., ..., Grandy, A. 2020. Long-term evidence shows that crop-rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in North America. *One Earth*. 2(3):284-293. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>
- Brenton P, Chemutai V, Pangestu M. 2022. Trade and food security in a climate change-impacted world. *Agricultural Economics*. 53(4):580-591. doi: <https://doi.org/10.1111/agec.12727>
- Chhogyel N, Kumar, L. 2018. Climate change and potential impacts on agriculture in bhutan: a discussion of pertinent issues. *Agriculture & Food Security* 7(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0229-6>
- Chhogyel N, Kumar L, Bajgai, Y. 2020. Consequences of climate change impacts and incidences of extreme weather events in relation to crop production in Bhutan. *Sustainability*, 12(10), 4319. doi: <https://doi.org/10.3390/su12104319>
- Davie-Martin C, Hageman K, Chin Y, Rougé V, Fujita Y. 2015. Influence of temperature, relative humidity, and soil properties on the soil-air partitioning of semivolatile pesticides: laboratory measurements and predictive models. *Environmental Science & Technology*. 49(17): 10431-10439. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02525>
- Dewi P, Nurjazuli N, Budiyo B. 2021. Studi literatur: paparan pestisida dan kejadian gangguan fungsi ginjal pada petani. *Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung*. 13(1): 29-39. doi: <https://doi.org/10.34011/juriskesbdg.v13i1.1825>
- Dumitru E, Berevoianu R, Tudor V, Teodorescu F, Stoica D, Giucă A, ... , Sterie C. 2023. Climate change impacts on vegetable crops: a systematic review. *Agriculture*. 13(10):1891. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture13101891>
- Fadli D. 2022. Pemanfaatan data satelit terhadap prediksi curah hujan. *Jurnal Konstruksi*. 20(1):194-201. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.20-1.1107>
- Falconnier G, Corbeels M, Boote K, Affholder F, Adam M, MacCarthy D, ..., Webber H. 2020. Modelling climate change impacts on maize yields under low nitrogen input conditions in sub-Saharan Africa. *Global Change Biology*. 26(10):5942-5964. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.15261>
- Fand B, Sul N, Bal S, Minhas P. 2015. Temperature impacts the development and survival of common cutworm (*Spodoptera litura*): simulation and visualization of potential population growth in India under warmer temperatures through life cycle modelling and spatial mapping. *Plos One*. 10(4):e0124682. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124682>
- Garuda S, Baliadi Y. 2018. Aplikasi metode tren waktu satu ragam dalam peramalan toleransi komoditas pangan terhadap perubahan iklim di Papua. *Informatika Pertanian*. 27(1):35. doi: <https://doi.org/10.21082/ip.v27n1.2018.p35-46>
- Giller K, Andersson J, Corbeels M, Kirkegaard J, Mortensen D, Erenstein O, ..., Vanlauwe B. 2015. Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 6. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00870>
- Gregory P, Ingram J, Brklacich M. 2005. Climate change and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 360(1463):2139-2148. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1745>
- Hadid A, Jumiyati S, Toknok B, Dua P, Haeruddin H. 2023. Adopsi dan strategi pengembangan pertanian berkelanjutan berbasis pertanian cerdas iklim. *Agroland*

- Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*. 30(3):275-286. doi: <https://doi.org/10.22487/agrolandnasional.v30i3.1941>
- Halawa D. 2024. Peran teknologi pertanian cerdas (smart farming) untuk generasi pertanian Indonesia. *Jurnal Kridatama Sains Dan Teknologi*. 6(2):502-512. <https://doi.org/10.53863/kst.v6i02.1226>
- Harvian K, Yuhan R. 2021. Kajian perubahan iklim terhadap ketahanan pangan. *Seminar Nasional Official Statistics*. 2020(1): 1052-1061. doi: <https://doi.org/10.34123/semnasoffstat.v2020i1.593>
- Heeb L, Jenner E, Cock M. 2019. Climate-smart pest management: building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *Journal of Pest Science*. 92(3):951-969. doi: <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01083-y>
- Hilman Y, Suciantini S, Rosliani R. 2019. Adaptasi tanaman hortikultura terhadap perubahan iklim pada lahan kering adaptation of horticultural crops to climate change in the upland. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*. 38(1):55. doi: <https://doi.org/10.21082/jp3.v38n1.2019.p55-64>
- Indrawati L, Prihatminingtyas B. 2023. Pengaruh perilaku agribisnis petani muda terhadap produksi tanaman hortikultura di Kecamatan Tumpang Kabupaten Malang. *Multidiciplinary Scientifict Journal*. 1(9): 506-514. doi: <https://doi.org/10.57185/mutiara.v1i9.71>
- Jiang T, Deng F, Dong W, Zhang Q, Liu P. 2024. Rice quality prediction and assessment of pesticide residue changes during storage based on quatformer. *Scientific Reports*. 14(1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59816-8>
- Juroszek P, Tiedemann A. 2012. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*. 151(2):163-188. doi: <https://doi.org/10.1017/s0021859612000500>
- Kadarsah K. 2010. Aplikasi ROC untuk uji kehandalan model HYBMG. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*. 11(1). doi: <https://doi.org/10.31172/jmg.v11i1.60>
- Kalogiannidis S, Kalfas D, Chatzitheodoridis F, Papaevangelou O. 2022. Role of crop-protection technologies in sustainable agricultural productivity and management. *Land*. 11(10):1680. doi: <https://doi.org/10.3390/land11101680>
- Kannan N. 2023. An analysis of the climate change effects on pesticide vapor drift from ground-based pesticide applications to cotton. *Scientific Reports*. 13(1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36941-4>
- Kluger D, Owen A, Lobell D. 2022. Combining randomized field experiments with observational satellite data to assess the benefits of crop rotations on yields. *Environmental Research Letters*. 17(4): 044066. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6083>
- Knox J, Hess T, Daccache A, Wheeler T. 2012. Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environmental Research Letters*. 7(3), 034032. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034032>
- Kumar R, Gautam H. 2014. Climate change and its impact on agricultural productivity in India. *Journal of Climatology & Weather Forecasting*. 2(1). doi: <https://doi.org/10.4172/2332-2594.1000109>
- Kumar S, Thilagam P, Shikha D, Saikanth D, Rahmani U, Huded S, ..., Panigrahi C. 2023. Adapting plant protection strategies to meet the challenges posed by climate change on plant diseases: a review. *International Journal of Environment and Climate Change*. 13(12):25-36. doi: <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i123657>

- Kung J, Chiappelli F, Cajulis O, Avezova R, Kossan G, Chew L., ..., Maida C. 2010. From systematic reviews to clinical recommendations for evidence-based health care: validation of revised assessment of multiple systematic reviews (r-amstar) for grading of clinical relevance. *The Open Dentistry Journal*. 4(1):84-91. doi: <https://doi.org/10.2174/1874210601004010084>
- Kurniahu H. 2022. Kunjungan arthropoda pada blok refugia ladang jagung di Desa Cepokorejo Kecamatan Palang Kabupaten Tuban. *Binar*. 1(1):1-6. doi: <https://doi.org/10.55719/binar.2022.1.1.1-6>
- Kurniawan R, Arisurya R. 2021. Kerentanan dan adaptasi rumah tangga petani terhadap perubahan iklim di Kabupaten Gunungkidul. *Jurnal Agro Ekonomi*. 38(2):127. doi: <https://doi.org/10.21082/jae.v38n2.2020.127-141>
- Lele O. 2023. Peran endomikoriza dan tingkat ketersediaan air pada tanah vertisol terhadap peningkatan serapan fosfor dan hasil paprika. *Savana Cendana*. 8(1): 1-5. doi: <https://doi.org/10.32938/sc.v8i01.1935>
- Liberati A, Altman D, Tetzlaff J, Mulrow C, Gøtzsche P, Ioannidis J, ..., Moher D. 2009. The prisma statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Plos Medicine*. 6(7):e1000100. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- Lister B, García A. 2018. Climate-driven declines in arthropod abundance restructure a rainforest food web. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115(44). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1722477115>
- Liu Z, Yang X., Lin X, Hubbard K, Lv S, Wang J. 2016. Maize yield gaps caused by non-controllable, agronomic, and socioeconomic factors in a changing climate of Northeast China. *The Science of the Total Environment*. 541:756-764. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.145>
- McCormick N, Bhole V, Lacaille D, Aviña-Zubieta J. 2015. Validity of diagnostic codes for acute stroke in administrative databases: a systematic review. *Plos One*. 10(8):e0135834. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135834>
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman D. 2009. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the prisma statement. *BMJ*. 339:b2535-b2535. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
- Murwanto B, Rosita Y. 2023. Determinant factors affecting pesticide poisoning, in Gisting sub-District, Tanggamus Regency. doi: <https://doi.org/10.4108/eai.20-9-2022.2334141>
- Nuraini T, Nuryanto D, Komalasari K, Satyaningsih R, Fajariana Y, Anggraeni R, ..., Sopaheluwakan A. 2019. Pengembangan model HYBMG 2.07 untuk prediksi iklim di Indonesia dengan menggunakan data tropical rainfall measuring mission (TRMM). *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*. 20(2):101. doi: <https://doi.org/10.31172/jmg.v20i2.610>
- Nurindah N, Yulianti T. 2018. Strategi pengelolaan serangga hama dan penyakit tebu dalam menghadapi perubahan iklim. *Buletin Tanaman Tembakau Serat & Minyak Industri*. 10(1):39. <https://doi.org/10.21082/btsm.v10n1.2018.39-53>
- Ogunbameru B, Mustapha S, Idrisa Y. 2013. Capacity building for climate change adaptation: modules for agricultural extension curriculum development. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 14(2):61-66. doi: <https://doi.org/10.18551/rjoas.2013-02.07>
- Parwin R, Ramadas M, Agarwal A, Atnurkar A. 2023. Impacts of climate change on future crop water demand in an agricultural watershed in Mayurbhanj District of

- Odisha, India. *Journal of Agrometeorology*. 25(2):326-329. doi: <https://doi.org/10.54386/jam.v25i2.1952>
- Pramono A. 2018. Emisi gas rumah kaca, cadangan karbon serta strategi adaptasi dan mitigasi pada perkebunan kopi rakyat di Nusa Tenggara Barat. *E-Journal Menara Perkebunan*. 86(2). doi: <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v86i2.294>
- Pujiati E, Sucahyo A. 2021. Pengaruh fito-pestisida terhadap hama penggerek daun serpentin (*Liriomyza* sp.) pada budidaya tanaman krisanthemum (*Chrysanthemum morifolium* ramat). *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*. 27(2):10. doi: <https://doi.org/10.55259/jiip.v27i2.548>
- Reddy G, Shi P, Hui C, Cheng, X, Ouyang F, Ge F. 2015. The seesaw effect of winter temperature change on the recruitment of cotton bollworms *Helicoverpa armigera* through mismatched phenology. *Ecology and Evolution*. 5(23):5652-5661. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.1829>
- Rehana S, Mujumdar P. 2012. Regional impacts of climate change on irrigation water demands. *Hydrological Processes*. 27(20):2918-2933.
- Ristian U, Ruslianto I, Sari K. 2022. Sistem monitoring smart greenhouse pada lahan terbatas berbasis internet of things (IoT). *Jurnal Edukasi Dan Penelitian Informatika (Jepin)*, 8(1)87. doi: <https://doi.org/10.26418/jp.v8i1.52770>
- Ristianti R., Prayoga, K., & Mariyono, J. 2022. Implementasi program asuransi usahatani padi (AUTO) di Kecamatan Tirto Kabupaten Pekalongan. *Agroland Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*. 29(2):151-163. doi: <https://doi.org/10.22487/agroland.nasional.v29i2.1073>
- Ruminta R, Irwan A, Nurmala T, dan Ramadayanty G. 2020. Analisis dampak perubahan iklim terhadap produksi kedelai dan pilihan adaptasi strategisnya pada lahan tadah hujan di Kabupaten Garut. *Kultivasi*. 19(2). doi: <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v19i2.27998>
- Ruminta R, Handoko H, Nurmala T. 2018. Indikasi perubahan iklim dan dampaknya terhadap produksi padi di Indonesia (studi kasus : Sumatera Selatan dan Malang Raya). *Jurnal Agro*. 5(1):48-60. doi: <https://doi.org/10.15575/1607>
- Santoso A. 2016. Pengaruh perubahan iklim terhadap produksi tanaman pangan di Provinsi Maluku. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*. 35(1):29. doi: <https://doi.org/10.21082/jpntp.v35n1.2016.p29-38>
- Sarvina Y. 2019. Dampak perubahan iklim dan strategi adaptasi tanaman buah dan sayuran di daerah tropis/climate change impact and adaptation strategy for vegetable and fruit crops in the tropic region. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian*. 38(2):65. doi: <https://doi.org/10.21082/jp3.v38.n2.2019.p65-76>
- Saulić M, Oveisi M, Djalović I, Božić D, Pishyar A, Savić A, ..., Vrbničanin S. 2022. How do long term crop rotations influence weed populations: exploring the impacts of more than 50 years of crop management in Serbia. *Agronomy*. 12(8):1772. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081772>
- Setiawati W, Sumarni N, Koesandriani Y, Hasyim A, Uhan T, Sutarya R. 2016. Penerapan teknologi pengendalian hama terpadu pada tanaman cabai merah untuk mitigasi dampak perubahan iklim. *Jurnal Hortikultura*. 23(2):174. doi: <https://doi.org/10.21082/jhort.v23n2.2013.p174-183>
- Shea B, Reeves B, Wells G, Thuku M, Hamel C, Moran, ..., Henry D. 2017. Amstar 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. *BMJ*. j4008. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.j4008>

- Shi Y, Kwan Y, Tan C, Thumboo J, Low L. 2018. A systematic review of the clinical application of data-driven population segmentation analysis. *BMC Medical Research Methodology*. 18(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0584-9>
- Shrestha S. 2019. Effects of climate change in agricultural insect pest. *Acta Scientific Agriculture*. 3(12):74-80. doi: <https://doi.org/10.31080/asag.2019.03.0727>
- Singh A, Pandey A, Santhosh D, Ganavi N, Sarma A, Deori C, ..., D S. 2024. A comprehensive review on greenhouse gas emissions in agriculture and evolving agricultural practices for climate resilience. *International Journal of Environment and Climate Change*. 14(5): 455-464. doi: <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i54206>
- Sukmawati, S. 2021. Pertumbuhan dan produksi jagung pulut pada sistem pertanian terpadu di lahan kering berbasis alley cropping. *Agroplantae Jurnal Ilmiah Terapan Budidaya Dan Pengelolaan Tanaman Pertanian Dan Perkebunan*, 10(2):85-95. doi: <https://doi.org/10.51978/agro.v10i2.297>
- Summaryanto N. 2016. Strategi peningkatan kapasitas adaptasi petani tanaman pangan menghadapi perubahan iklim. *Forum Penelitian Agro Ekonomi*. 30(2):73. doi: <https://doi.org/10.21082/fae.v30n2.2012.73-89>
- Suryanto A, Sudiarto S, Permanasari P, Fajarwati S, Damaiyanti D. 2021. Peran PGPR sebagai bahan ramah lingkungan dalam kegiatan pemberdayaan kelompok tani di Desa Pujon Kidul. *Jurnal Akses Pengabdian Indonesia*. 6(1):115-120. doi: <https://doi.org/10.33366/japi.v6i1.2399>
- Susanti E, Surmaini E, Estiningtyas W. 2020. Parameter iklim sebagai indikator peringatan dini serangan hama penyakit tanaman. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 12(1):59. doi: <https://doi.org/10.21082/jsdl.v12n1.2018.59-70>
- Suwardi S. 2018. Penerapan teori difusi inovasi dalam penguatan kapasitas kelompok tani. *Agriekstensi*, 17(2), 98-106. doi: <https://doi.org/10.34145/agriekstensi.v17i2.85>
- Suwondo S, Darmadi D, Yunus M. 2018. Perlindungan dan pengelolaan ekosistem: analisis politik ekologi pemanfaatan lahan gambut sebagai hutan tanaman industri. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*. 140-154. doi: <https://doi.org/10.36813/jplb.2.2.140-154>
- Trębicki P, Nancarrow N, Cole E, Bosque-Pérez N, Constable F, Freeman A, ... , Fitzgerald G. 2015. Virus disease in wheat predicted to increase with a changing climate. *Global Change Biology*. 21(9):3511-3519. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.12941>
- Waiba S. 2023. Economics impact of climate change on agriculture GDP in Bhutan: empirical evidence from ardl approach. *International Journal of Economics*. 2(2):706-721. doi: <https://doi.org/10.55299/ijec.v2i2.604>
- Widiawati A, Harini N, Irpawa D, Anggraini N, Hidayat N. 2025. Dampak anomali iklim terhadap produksi padi di Kecamatan Seputih Mataram Kabupaten Lampung Tengah. *Journal of Agriculture and Animal Science*. 5(1):79-88. doi: <https://doi.org/10.47637/agrimals.v5i1.1734>
- Yang L, Li M, Liu J, Zeng J, Lu Y. 2024. Long-term expansion of cereal crops promotes regional population increase of polyphagous *Helicoverpa armigera*. *Journal of Pest Science*. 98(1):131-144. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01778-x>
- Yastika P, Vipriyanti N, Partama I, Supawarta I, Sudiarta I. 2023. Analisis respon petani terhadap perubahan iklim dan curah hujan di Subak Jatiluwih, Tabanan Bali, Indonesia. *Agro Bali Agricultural Journal*. 6(3):783-792. doi: <https://doi.org/10.37637/ab.v6i3.1262>