



Pemanfaatan IoT untuk Mitigasi Risiko Organisme Pengganggu Tanaman pada Agroekosistem Lahan Kering

Utilization of IoT to Mitigate the Risk of Plant Pest Organisms in Dryland Agroecosystems

Apriadi¹ | Muhammad Sarjan¹ | Pending Dadih Permana¹

¹ Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, 83115Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia

Abstract

Pengendalian hama terpadu (PHT) merupakan pendekatan penting dalam budidaya pertanian berkelanjutan, terutama di lahan kering yang rentan terhadap serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT). Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan peluang peningkatan efektivitas PHT melalui pemantauan lingkungan secara real-time, deteksi dini gejala serangan, dan intervensi selektif. Kajian ini menelaah literatur terkait pemanfaatan IoT dalam pengendalian OPT pada budidaya ubi jalar (*Ipomoea batatas*), kacang hijau (*Vigna radiata*), sorgum (*Sorghum bicolor*), dan singkong (*Manihot esculenta*), baik dari studi global maupun nasional. Hasil analisis menunjukkan implementasi IoT dapat dilakukan melalui kombinasi sensor suhu, kelembapan, kamera visual, sistem informasi geografis (SIG), dan platform cloud. Kendala utama implementasi meliputi keterbatasan infrastruktur dan literasi digital petani. Temuan menegaskan perlunya pendekatan bertahap dan integratif, dengan mempertimbangkan kesiapan infrastruktur dan sumber daya manusia. Kajian ini menjadi dasar bagi pengembangan kebijakan berbasis data guna mendorong adopsi IoT yang efektif dan berkelanjutan di lahan kering.

Keywords: Internet of Things, Pengendalian Hama Terpadu, pertanian presisi, lahan kering, kajian literatur.

Abstract

Integrated pest management (IPM) is a crucial approach to sustainable agricultural cultivation, particularly in drylands, which are vulnerable to attacks by plant pests (OPTs). Advances in Internet of Things (IoT) technology offer opportunities to increase the effectiveness of IPM through real-time environmental monitoring, early detection of attack symptoms, and frequent interventions. This study reviews literature related to the use of IoT in pest control in sweet potato (*Ipomoea batatas*), mung bean (*Vigna radiata*), sorghum (*Sorghum bicolor*), and cassava (*Manihot esculenta*) cultivation, from both global and national studies. The analysis shows that IoT implementation can be achieved through a combination of temperature and humidity sensors, visual cameras, geographic information systems (GIS), and cloud platforms. The main implementation constraints include limited infrastructure and farmers' digital literacy. The conclusions emphasize the need for a phased and integrative approach, taking into account infrastructure and human resource readiness. This study provides the basis for data-driven policy development to encourage effective and sustainable IoT implementation in drylands.

Keywords: Internet of Things, Integrated Pest Management, precision agriculture, dry land, literature review.

How to cite: Apriadi, Sarjan, M., Permana, P.D. (2025). Pemanfaatan IoT untuk Mitigasi Risiko Organisme Pengganggu Tanaman pada Agroekosistem Lahan Kering. 1(3): 29-38.

1. Pendahuluan

Agroekosistem lahan kering memiliki potensi strategis dalam mendukung ketahanan pangan, khususnya di wilayah dengan keterbatasan sumber daya, produktivitas tanah rendah, dan kerentanan iklim tinggi. Komoditas seperti ubi jalar (*Ipomoea batatas*), kacang hijau (*Vigna radiata*), sorgum (*Sorghum bicolor*), dan singkong (*Manihot esculenta*) menunjukkan adaptasi baik terhadap kondisi tersebut melalui efisiensi penggunaan air, toleransi terhadap kekeringan, dan kebutuhan input yang rendah (Umi Salamah, 2025; C. Prabakaran & R. Kalaivani, 2025).

Selain fungsi pangan, beberapa di antaranya juga berkontribusi terhadap konservasi lahan. Ubi jalar berfungsi sebagai penutup tanah yang efektif dalam mengurangi erosi dan meningkatkan retensi air (Yadav, 2021), sedangkan sorgum dan leguminosa seperti kacang hijau berperan dalam memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kandungan karbon dan nitrogen tanah (Sainju et al., 2016; Li et al., 2022; Ardiansyah et al., 2015). Ketiga komoditas ini juga relevan untuk diintegrasikan dalam sistem agroforestri, karena toleran terhadap keberadaan tanaman berkayu dan dapat memperkuat stabilitas ekosistem melalui peningkatan tutupan lahan dan pengurangan erosi (Tanaman Penyusun Dengan Sistem Agroforestry Dalam Pemenuhan Kebutuhan Pangan et al., 2025). Namun demikian, kontribusi ekologis tersebut belum sepenuhnya menjamin keberhasilan budidaya apabila serangan hama dan penyakit tidak ditangani secara efektif.

Serangan OPT seperti *Spodoptera litura* (ulat grayak), *Aphis spp.* (kutu daun), dan *Cylas formicarius* (penggerek umbi) masih menjadi tantangan serius yang menyebabkan penurunan hasil panen secara signifikan (M Zul Qurnain et al., 2025a; Sari et al., 2024). Tantangan ini semakin kompleks pada lahan kering yang memiliki tekanan lingkungan tinggi, keterbatasan air, serta minimnya pengawasan manual secara rutin. Ketidadaan sistem pemantauan yang cepat dan akurat mengakibatkan deteksi dini serangan OPT sering terlambat, sehingga menyebabkan eskalasi serangan dan kegagalan dalam pengendalian.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, penerapan teknologi Internet of Things (IoT) menjadi solusi inovatif yang menjanjikan dalam mendukung implementasi Pengendalian Hama Terpadu (PHT). IoT merupakan elemen penting dalam pertanian presisi (precision agriculture) yang memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara otomatis dan real-time, termasuk parameter suhu, kelembapan tanah, intensitas cahaya, dan aktivitas hama (M Zul Qurnain et al., 2025). Melalui integrasi sensor dan jaringan komunikasi digital, IoT dapat memberikan peringatan dini terhadap potensi serangan hama, memantau dinamika iklim mikro yang memicu lonjakan populasi OPT, serta mendukung pengambilan keputusan pengendalian yang lebih cepat, tepat, dan ramah lingkungan.

Oleh karena itu, kajian literatur ini bertujuan untuk mengevaluasi kontribusi teknologi Internet of Things (IoT) dalam meningkatkan efektivitas sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) pada berbagai komoditas tanaman di lahan kering. Evaluasi dilakukan melalui telaah naratif terhadap berbagai studi nasional dan global terkait penerapan IoT dalam optimalisasi PHT, serta dampaknya terhadap produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian lahan kering.

2. Metodologi

Metode kajian yang digunakan adalah narrative literature review (Baumeister & Leary, 1997), untuk mengeksplorasi pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) dalam mitigasi risiko Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) pada berbagai komoditas di lahan kering. Literatur dikumpulkan melalui pencarian sistematis pada basis data seperti Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, dan Garuda, dengan kata kunci: “Internet of Things”, “pest monitoring”, “integrated pest management”, “dryland agriculture”, “sweet potato”, “mungbean”, “sorghum”, serta padanannya dalam Bahasa Indonesia.

Seleksi dilakukan terhadap publikasi berbahasa Indonesia dan Inggris yang terbit pada periode 2015–2025, dengan kriteria akses penuh dan relevansi terhadap topik pertanian dan pengendalian OPT di Indonesia. Sebanyak 38 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis lebih lanjut menggunakan pendekatan tematik. Proses pengkodean dilakukan secara manual menggunakan spreadsheet, dimulai dengan open coding untuk mengidentifikasi isu utama, kemudian dikonsolidasikan ke dalam tiga tema utama: potensi teknologi, tantangan implementasi, dan relevansi kontekstual.

Temuan dari berbagai studi disintesis secara naratif untuk menggambarkan kecenderungan umum, peluang implementasi, serta hambatan adopsi IoT dalam konteks agroekosistem lahan kering. Kajian ini sepenuhnya berbasis literatur dan tidak melibatkan pengumpulan data primer.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Agroekosistem Lahan Kering dan Implikasinya terhadap Dinamika OPT

Agroekosistem lahan kering ditandai oleh suhu siang hari yang tinggi, fluktuasi kelembapan yang ekstrem, serta ketersediaan air tanah yang terbatas. Kondisi ini menciptakan tekanan lingkungan (stres abiotik) yang signifikan terhadap pertumbuhan berbagai tanaman pangan, termasuk ubi jalar (*Ipomoea batatas*), kacang hijau (*Vigna radiata*), sorgum (*Sorghum bicolor*), dan singkong (*Manihot esculenta*). Pada tanaman ubi jalar, stres kekeringan diketahui menurunkan kandungan klorofil, mengurangi biomassa, serta menurunkan efisiensi fotosintesis (Abewoy, 2023). Lemahnya kondisi fisiologis akibat stres abiotik ini turut meningkatkan kerentanan tanaman terhadap tekanan biotik seperti serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT).

Setiap komoditas memiliki OPT utama yang spesifik dan berdampak signifikan terhadap hasil. Ubi jalar rentan terhadap *Cylas formicarius* (kumbang boleng), *Omphisa anastomasalis* (penggerek batang), dan *Bemisia tabaci* (kutu kebul), yang merusak umbi, batang, dan daun (Sari et al., 2021; Raza et al., 2019). Singkong diserang oleh *B. tabaci*, *Tetranychus urticae* (tungau merah), dan *Spodoptera litura* (ulat grayak) yang menurunkan kualitas daun dan hasil (FAO, 2022; Legg & Fauquet, 2004). Pada kacang hijau, hama utama meliputi *B. tabaci*, *Ophiomyia phaseoli* (lalat kacang), dan *S. litura*; sementara pada

sorgum, hama yang sering ditemukan adalah *B. tabaci*, *Melanaphis sacchari* (aphid sorgum), dan *S. frugiperda* (Wu & Guo, 2005; Armstrong & Rooney, 2020).

Variasi jenis dan intensitas serangan hama pada setiap komoditas menegaskan perlunya strategi Pengendalian Hama Terpadu (PHT) yang spesifik komoditas dan kontekstual dengan kondisi lahan kering. (Subedi et al., 2023) menjelaskan bahwa lingkungan panas dan kering mempercepat perkembangan hama, meningkatkan laju reproduksi, memperpanjang umur larva, dan meningkatkan aktivitas makan. Selain itu, perubahan iklim akibat kekeringan dapat meningkatkan jumlah generasi per tahun (voltinisme), yang menyebabkan populasi hama berkembang lebih cepat dan agresif dibandingkan dengan lingkungan basah yang lebih stabil.

Meskipun komoditas seperti ubi jalar, kacang hijau, sorgum, dan singkong memiliki toleransi yang relatif tinggi terhadap kekeringan, kemampuan ini tidak serta merta melindungi tanaman-tanaman tersebut dari tekanan biotik berupa serangan organisme pengganggu tanaman. Raza et al. (2019) menjelaskan bahwa perubahan iklim termasuk kekeringan dan fluktuasi suhu meningkatkan tekanan hama dan memperbesar kerentanan tanaman terhadap organisme pengganggu tanaman (OPT). Interaksi antara stres abiotik dan biotik ini berpotensi menimbulkan kerusakan yang lebih besar dibandingkan kondisi lingkungan optimal.

Dengan demikian, karakteristik agroekosistem lahan kering secara nyata memperkuat dinamika dan agresivitas serangan OPT. Kompleksitas interaksi antara faktor abiotik dan biotik pada kondisi lahan kering menuntut strategi mitigasi risiko yang lebih presisi, berbasis data, dan responsif terhadap perubahan lingkungan mikro. Dalam konteks ini, penerapan sistem monitoring berbasis teknologi seperti IoT menjadi sangat penting untuk mendukung efektivitas Pengendalian Hama Terpadu (PHT) di wilayah pertanian lahan kering.

3.2 Konsep Pengendalian Hama Terpadu Berbasis IoT Komoditas pangan lahan kering

Pengendalian Hama Terpadu (PHT) merupakan pendekatan pengelolaan hama yang memadukan berbagai metode, seperti kultur teknis, biologis, mekanis, dan penggunaan pestisida kimia secara terbatas. Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) merupakan kerangka kerja pengendalian hama yang bertujuan meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menjaga kesehatan ekosistem, dengan mengintegrasikan berbagai strategi ramah lingkungan untuk mendukung keberlanjutan produksi pertanian (Zhou et al., 2024). Prinsip dasar dari Pengendalian Hama Terpadu (PHT) adalah tidak mengandalkan satu metode tunggal, melainkan mengintegrasikan berbagai teknik untuk menekan populasi Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) hingga di bawah ambang ekonomi, sekaligus meminimalkan dampak terhadap lingkungan, manusia, serta organisme lain yang bermanfaat bagi tanaman dan ekosistem pertanian (Zhou et al., 2024).

Pada budidaya tanaman pangan di agroekosistem lahan kering, penerapan PHT menghadapi tantangan tersendiri, seperti fluktuasi iklim mikro dan keterbatasan sumber daya petani dalam memantau kondisi lapangan. Oleh karena itu, efektivitas PHT di lahan kering sangat bergantung pada kemampuan deteksi dini dan pengambilan keputusan yang tepat waktu. Hal ini dapat dicapai melalui sistem pemantauan yang akurat dan berkelanjutan.

Dalam konteks inilah, teknologi Internet of Things (IoT) hadir sebagai solusi pendukung dalam implementasi PHT modern. IoT memungkinkan pengumpulan data lapangan secara real-time yang dapat digunakan untuk mendukung keputusan pengendalian. Teknologi ini memperkuat prinsip pertanian presisi dan adaptif, dengan cara menyediakan informasi berbasis data lapangan kondisi agroekosistem (M Zul Qurnain et al., 2025; Wolfert et al., 2017).

Dengan dukungan teknologi digital seperti Internet of Things (IoT), pendekatan PHT di lahan kering menjadi lebih efisien, adaptif terhadap dinamika lingkungan, serta mendukung tujuan pertanian berkelanjutan

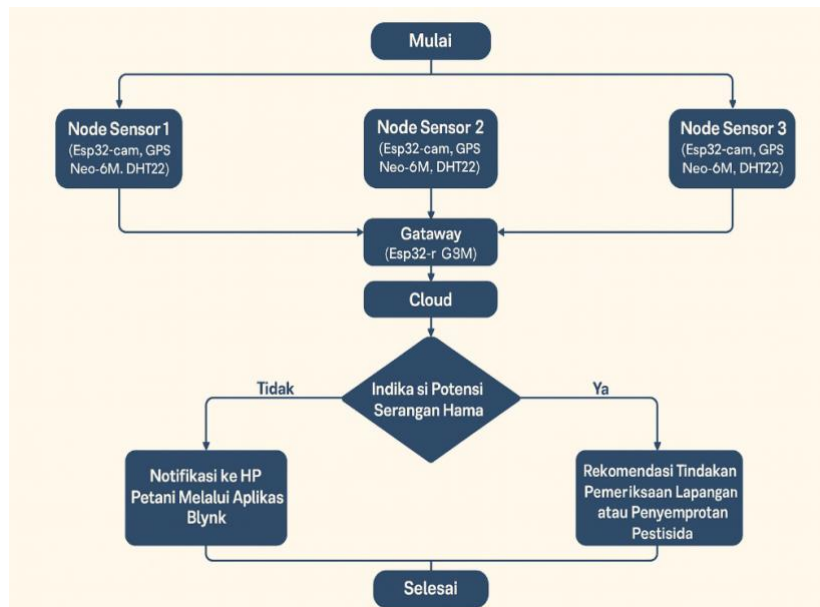
3.3 Penerapan Teknologi Internet of Things (IoT) dalam Pengendalian Hama Terpadu

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) pada budidaya tanaman pangan di lahan kering merupakan pendekatan inovatif untuk mengatasi lemahnya deteksi dini dan lambatnya respons terhadap serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT). Sistem ini bekerja secara otomatis, pemantauan kontinu dan berbasis data, memperkuat prinsip pertanian presisi yang menekankan efisiensi, adaptivitas, dan keberlanjutan.

Beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh M Zul Qurnain et al. (2025) dan Bakar et al. (2023) menunjukkan bahwa penerapan sistem pemantauan OPT berbasis IoT sudah mulai diimplementasikan secara nyata di Indonesia, dengan pengiriman data sensor ke cloud dan fitur peringatan otomatis bagi petani. Sementara itu, di tingkat global, studi-studi seperti yang dilakukan oleh Wang et al. (2024) dan Mansoor et al. (2025) membuktikan bahwa teknologi IoT dan smart sensor mampu meningkatkan efektivitas pengendalian hama dan penyakit secara real-time, mendukung pertanian presisi yang adaptif, dan telah diterapkan di berbagai negara dengan hasil yang signifikan.

Visualisasi citra tanaman memudahkan deteksi gejala awal serangan OPT, seperti perubahan warna daun, nekrosis, atau gigitan hama. Teknologi ini memungkinkan identifikasi gejala awal secara cepat dan mendukung pengendalian hama yang lebih selektif serta ramah lingkungan. Menurut Eze et al. (2025), integrasi sensor IoT dengan sistem pemantauan online

memungkinkan pendeteksian kondisi lingkungan secara real-time, sehingga respons petani dapat dilakukan lebih cepat dan risiko kerusakan tanaman dapat ditekan. Alur kerja sistem pemantauan berbasis IoT yang dijelaskan di atas dapat divisualisasikan melalui Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Alur sistem pemantauan IoT yang dimulai dari pencatatan parameter lingkungan oleh sensor, dilanjutkan dengan pengiriman data ke platform cloud, hingga proses analisis dan penyampaian peringatan dini kepada petani untuk pengambilan keputusan cepat dalam pengendalian hama (Qurnain et al., 2025)

Beberapa studi, seperti yang diuraikan oleh Eze et al. (2025), menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) dapat diintegrasikan dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk meningkatkan akurasi pengendalian hama secara spasial. Dalam studi tersebut dijelaskan bahwa sensor yang dilengkapi modul GPS memungkinkan pencatatan lokasi spesifik dari anomali mikroklimat atau indikasi serangan OPT, yang kemudian dapat divisualisasikan dalam bentuk peta digital. Integrasi ini mendukung pendekatan manajemen spesifik lokasi (*site-specific management*), sehingga pemanfaatan sumber daya pengendalian dapat dilakukan secara lebih efisien dan terarah.

Namun demikian, meskipun Eze et al. (2025) menekankan pentingnya integrasi SIG, beberapa studi lain seperti Boursianis et al. (2022) menyoroti kendala teknis dan biaya tinggi dalam penerapannya, khususnya di wilayah lahan kering. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun SIG memiliki potensi besar dalam meningkatkan akurasi pengendalian, implementasinya tetap memerlukan dukungan kebijakan, infrastruktur, dan pendampingan teknis yang memadai agar dapat diterapkan secara efektif di tingkat petani.

Lebih jauh, sistem dapat dikembangkan melalui integrasi dengan kecerdasan buatan (AI) dan algoritma machine learning. Integrasi kecerdasan buatan dan machine learning memungkinkan pendeteksian otomatis dan prediksi kemunculan hama berdasarkan pola data historis serta faktor lingkungan yang relevan (Domingues et al., 2022).

Dengan menggabungkan pemantauan sensor lingkungan, analisis citra visual, notifikasi real-time, dan pemetaan spasial berbasis SIG, sistem IoT memberikan dasar pengambilan keputusan pengendalian hama yang lebih presisi. Teknologi ini mampu mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia, meningkatkan efisiensi input produksi, dan memperkuat praktik pertanian berkelanjutan melalui deteksi otomatis dan pengurangan kebutuhan pestisida (Chen & Costanza, 2024; Domingues et al., 2022).

3.4 Manfaat Teknologi IoT dalam Pengambilan Keputusan Pengendalian Hama Terpadu

Teknologi Internet of Things (IoT) memiliki kontribusi strategis dalam memperkuat implementasi Pengendalian Hama Terpadu (PHT), khususnya pada agroekosistem lahan kering yang rentan terhadap tekanan biotik dan abiotik. Berbagai kajian terdahulu menyatakan bahwa sistem berbasis Internet of Things (IoT) tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan pengendalian hama yang lebih selektif, presisi, dan berbasis data aktual (Ahmed et al., 2024; Garai & Research Scholar, 2024; M Zul Qurnain et al., 2025). Salah satu manfaat utama dari teknologi IoT yang banyak diidentifikasi dalam literatur adalah kemampuannya dalam menyediakan informasi secara berkelanjutan mengenai kondisi

lingkungan dan potensi serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), sehingga memungkinkan tindakan yang lebih dini dan tepat. Informasi ini membantu petani dalam mendeteksi gejala awal serangan serta menentukan waktu dan metode pengendalian yang paling efektif, tanpa harus bergantung sepenuhnya pada inspeksi manual yang cenderung subjektif dan seringkali terlambat (Ahmed et al., 2024; Garai & Research Scholar, 2024; M Zul Qurnain et al., 2025).

Selain itu, beberapa studi juga menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT mendukung pencatatan dan penyimpanan data historis secara otomatis (*data logging*) yang bermanfaat dalam analisis tren serangan hama dari waktu ke waktu (Chen & Costanza, 2024; Domingues et al., 2022). Fitur ini memungkinkan para petani atau pengambil keputusan untuk mempelajari pola musiman, mengidentifikasi periode kritis, dan menyusun strategi pengendalian yang lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan. Data ini sangat berguna dalam menganalisis pola musiman serangan hama, memprediksi periode kritis, serta menyusun jadwal tanam dan strategi pengendalian yang lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan. Bahkan, informasi tersebut menjadi dasar untuk menyesuaikan ambang ekonomi (AE) secara dinamis berdasarkan kondisi aktual, sehingga menghindari risiko pengendalian yang dilakukan terlalu dini (*over-control*) atau terlalu lambat (*under-control*), yang keduanya dapat merugikan petani dan ekosistem (Goyal et al., 2024; Ramasamy et al., 2023).

Dari sisi sosial dan ekonomi, pemanfaatan IoT dapat mengurangi intervensi pestisida secara berlebihan, sehingga turut menurunkan biaya produksi serta risiko pencemaran lingkungan (Goyal et al., 2024; Ramasamy et al., 2023). Selain itu, teknologi ini mendorong peningkatan literasi digital petani, terutama jika diintegrasikan ke dalam program pelatihan dan pendampingan teknis (Qurnain et al., 2025; Goyal et al., 2024). Platform digital berbasis cloud yang digunakan juga memungkinkan kolaborasi antara petani, penyuluh, dan peneliti dalam memantau dan merespons dinamika OPT secara real-time (Qurnain et al., 2025; Ramasamy et al., 2023; Goyal et al., 2024).

Secara keseluruhan, pemanfaatan IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis dalam pengendalian hama, tetapi juga mentransformasi sistem pengambilan keputusan di sektor pertanian. Sistem yang sebelumnya bersifat reaktif dan berbasis pengalaman kini berkembang menjadi sistem yang berbasis data, responsif, dan adaptif terhadap perubahan iklim mikro. Dengan demikian, IoT berperan penting dalam membangun praktik pertanian berkelanjutan yang lebih tangguh, efisien, dan ramah lingkungan, terutama pada wilayah pertanian lahan kering yang sangat membutuhkan sistem pertanian berbasis teknologi presisi (Goyal et al., 2024; Wang et al., 2024; Ramasamy et al., 2023).

3.5 Tantangan dan Prospek Penerapan IoT dalam Pengendalian Hama Terpadu di Lahan Kering

Meskipun teknologi Internet of Things (IoT) memiliki potensi besar dalam mendukung Pengendalian Hama Terpadu (PHT) dan pengembangan pertanian presisi, penerapannya di lahan kering masih menghadapi beberapa kendala utama. Salah satu tantangan terbesar adalah keterbatasan jaringan internet dan infrastruktur komunikasi, terutama di wilayah pedesaan dan daerah kering yang jauh dari pusat perkotaan. Kondisi ini menghambat proses pengiriman data secara kontinu sehingga akurasi deteksi dini menurun (Eze et al., 2025).

Selain itu, biaya awal instalasi perangkat IoT seperti sensor, *gateway*, dan kamera penginderaan masih relatif tinggi bagi sebagian besar petani skala kecil. Minimnya akses pembiayaan membuat adopsi teknologi berjalan lambat tanpa dukungan lembaga pemerintah maupun sektor swasta (M Zul Qurnain et al., 2025; Mansoor et al., 2025; Goyal et al., 2024; Ramasamy et al., 2023). Tantangan lain yang tidak kalah penting adalah keterbatasan pengetahuan dan keterampilan digital petani dalam mengoperasikan perangkat berbasis IoT. Sebagian besar petani di daerah kering belum terbiasa menggunakan teknologi digital untuk kegiatan monitoring pertanian, sehingga dibutuhkan pelatihan intensif dan pendampingan berkelanjutan agar sistem dapat dimanfaatkan secara optimal (M Zul Qurnain et al., 2025; Mansoor et al., 2025; Goyal et al., 2024).

Tantangan tambahan yang perlu mendapat perhatian adalah penyesuaian ambang batas ekonomi (AE) dalam sistem PHT berbasis IoT. Nilai AE yang selama ini digunakan biasanya bersifat statis karena dihitung berdasarkan variabel ekonomi dan biologi yang tetap. Namun, pada sistem berbasis IoT, dinamika lingkungan, iklim mikro, dan perkembangan hama dapat berubah sangat cepat. Data sensor yang bergerak secara kontinu membuat nilai AE harus diperbarui atau disesuaikan agar tetap relevan dengan kondisi aktual di lapangan. Tanpa penyesuaian ini, terdapat risiko tindakan pengendalian dilakukan terlalu cepat (*over-control*) atau terlalu lambat (*under-control*), yang keduanya dapat merugikan petani dan merusak ekosistem musuh alami.

Walaupun menghadapi berbagai tantangan, prospek penerapan Internet of Things (IoT) dalam sektor pertanian Indonesia, khususnya pada budidaya ubi jalar di lahan kering, tetap sangat menjanjikan. Dengan dukungan dari pemerintah, perguruan tinggi, dan lembaga penelitian, teknologi ini berpotensi menjadi fondasi utama dalam pengembangan pertanian cerdas (*smart agriculture*) yang menekankan pada efisiensi penggunaan sumber daya, peningkatan produktivitas, serta pengelolaan lingkungan yang lebih berkelanjutan (Rashid et al., 2025).

Dari sisi lingkungan, penerapan teknologi IoT memungkinkan respons yang lebih cepat terhadap munculnya gejala awal serangan hama, serta membantu petani mengurangi penggunaan pestisida yang berlebihan melalui pemantauan berbasis data, mengurangi emisi karbon, serta meminimalkan limbah pertanian melalui pengambilan keputusan yang lebih presisi dan selektif

(Rashid et al., 2025). Teknologi ini juga memungkinkan penerapan sistem pemantauan energi rendah dengan sensor hemat daya, sehingga jejak ekologisnya relatif kecil.

Namun demikian, keamanan perangkat IoT di lapangan menjadi isu penting yang perlu diperhatikan. Perangkat seperti sensor, kamera, dan modul komunikasi yang diletakkan di area terbuka rentan terhadap pencurian, kerusakan oleh cuaca ekstrem, atau gangguan binatang. Oleh karena itu, desain perangkat harus memperhatikan daya tahan fisik, proteksi terhadap air dan debu (IP rating), serta strategi pengamanan berbasis lokasi seperti GPS tracker dan penguncian perangkat keras (Eze et al., 2025).

Selain itu, aspek biaya menjadi tantangan nyata bagi adopsi teknologi ini di kalangan petani kecil. Investasi awal untuk instalasi sistem IoT termasuk perangkat sensor, gateway komunikasi, dan langganan platform data masih relatif mahal dan membutuhkan model pembiayaan kolaboratif. Beberapa studi menyarankan pola pembiayaan berbasis koperasi petani, subsidi pemerintah, atau skema kemitraan dengan sektor swasta agar adopsi dapat berlangsung secara luas dan berkelanjutan (Mansoor et al., 2025; “The State of Food and Agriculture 2022,” 2022).

3.6 Penerapan IoT dalam Pengendalian Hama Terpadu di Berbagai Tempat

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) kini tidak lagi sekadar menjadi konsep, tetapi telah diimplementasikan secara nyata di berbagai wilayah, baik di Indonesia maupun di dunia, sebagai bagian dari pengembangan pertanian presisi.

Hadi et al. (2025) menyampaikan bahwa salah satu contoh penerapan sistem irigasi berbasis IoT yang berhasil secara komersial terdapat pada lahan pertanian padi di California, Amerika Serikat. Sistem ini memanfaatkan berbagai sensor kelembapan tanah, sensor cuaca, dan pompa air otomatis yang terintegrasi dengan platform cloud untuk memantau kelembapan tanah secara real-time dan mengatur irigasi secara otomatis. Menurut kajian tersebut, penerapan sistem ini dilaporkan mampu menghemat penggunaan air hingga 30–40%. Selain itu, stabilitas iklim mikro yang dihasilkan dari sistem ini diidentifikasi dapat meningkatkan kesehatan tanaman dan secara tidak langsung menurunkan risiko serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT).

Di India, penggunaan sistem irigasi berbasis IoT oleh petani skala kecil telah dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan menjaga kesehatan tanaman di wilayah kering, sehingga dapat menurunkan risiko gangguan hama. Di negara lain seperti Belanda, Jepang, dan Australia, teknologi IoT telah dimanfaatkan secara luas untuk memantau kesehatan tanaman, mendeteksi gangguan sejak dini, serta mengendalikan lingkungan pertanian secara presisi melalui kombinasi sensor, kamera, dan drone (Hadi et al., 2025).

Implementasi global ini memperkuat bukti bahwa IoT memiliki potensi besar dalam mendukung sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) modern melalui pemantauan berkelanjutan, pemetaan spasial, dan intervensi berbasis data yang lebih tepat sasaran.

Namun demikian, keberhasilan tersebut tidak bisa langsung direplikasi tanpa adaptasi berbasis konteks petani Indonesia, mengingat masih terdapat keterbatasan infrastruktur teknologi, akses jaringan, serta literasi digital di kalangan petani. Oleh karena itu, diperlukan studi kontekstual yang lebih adaptif guna mengevaluasi potensi penerapan teknologi ini dalam kondisi sosial-ekonomi dan geografis yang spesifik.

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) di sektor pertanian Indonesia menunjukkan perkembangan positif dalam mendukung efisiensi produksi dan pengendalian hama. Misalnya, penggunaan drone sprayer untuk aplikasi pestisida dan pemupukan di Kalimantan Barat, serta smart greenhouse berbasis sensor di Kabupaten Malang terbukti meningkatkan akurasi pengendalian tanaman dan efisiensi input Hadi et al. (2025). Sari et al. (2024) mencatat bahwa sistem irigasi cerdas berbasis sensor suhu, aliran air, dan kelembapan mampu beroperasi secara presisi dan kontinu, dengan sistem pintu air otomatis yang menyesuaikan tinggi air secara real-time.

Dalam budidaya hortikultura, penerapan IoT juga telah berhasil menekan faktor risiko OPT. Pada jamur tiram, misalnya, sistem sensor suhu, kelembapan, dan pH menunjukkan tingkat error hanya 1–3% dan 100% keberhasilan pengiriman data. Sistem smart farming pada kebun bunga gumitir di Bali yang dikembangkan oleh Putu et al. (2022) menunjukkan tingkat keberhasilan deteksi kelembapan mencapai 93%, berkontribusi terhadap efisiensi penyiraman dan pemberian pupuk secara otomatis.

Implementasi lain juga tercatat di IPB Arkeman et al. (2022), Universitas Tarumanagara (Hugeng et al., 2023), dan UGM (2024), yang menunjukkan bahwa sistem IoT dalam pertanian mampu meningkatkan efisiensi pemantauan lingkungan, transparansi proses, dan otomatisasi tindakan pengelolaan. Di UGM, pengembangan dilakukan melalui Smart Agri Plant Factory dengan sistem pemantauan real-time suhu, cahaya, dan kelembapan yang mendukung pengelolaan iklim mikro di green house tropis.

Pada wilayah lahan kering, Universitas Mataram melalui Program Pascasarjana Pertanian Lahan Kering mengembangkan sistem deteksi serangan hama seperti *Cylas formicarius* dan *Spodoptera litura* pada ubi jalar, dengan mengombinasikan sensor dan kamera ESP32-CAM (Qurnain et al., 2025). Dukungan pemerintah daerah juga terlihat dari program “Pertanian Cerdas

Berbasis Teknologi Digital” di NTB yang mulai menerapkan sensor iklim mikro sebagai fondasi PHT berbasis IoT (Dinas Pertanian NTB, 2022).

Berbagai studi dan implementasi tersebut menegaskan bahwa teknologi IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional pertanian, tetapi juga membuka peluang besar dalam deteksi dini Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), pengendalian berbasis data, dan pengurangan ketergantungan pada pestisida kimia. Penerapan IoT menjadi fondasi utama dalam pembangunan sistem PHT berkelanjutan, terutama di wilayah-wilayah yang rentan secara ekologi seperti lahan kering.

Sintesis dari berbagai studi terkait pemanfaatan teknologi IoT dalam sistem PHT ditampilkan dalam Tabel 1 berikut untuk memperjelas variasi pendekatan, temuan utama, serta tantangan penerapannya.

Tabel 1 Sintesis Studi Pemanfaatan IoT dalam Sistem PHT				
Penulis	Tahun	Teknologi IoT yang Digunakan	Hasil Utama	Tantangan
Eze et al. (Nigeria)	2023	IoT + GIS	Manajemen pengendalian spasial berbasis lokasi	Perlu data lokal yang valid dan berkelanjutan
Domingues et al. (Portugal)	2022	IoT + AI	Prediksi dini serangan hama menggunakan big data	Infrastruktur jaringan dan skalabilitas
Sari et al. (Jawa Tengah & DIY)	2024	Sensor suhu, aliran air, kelembapan, IoT, cloud	Smart irigasi otomatis: pemantauan & buka-tutup pintu air presisi, monitoring real-time	Skala masih terbatas; belum diuji pada banyak komoditas
FTP UGM (Yogyakarta)	2021	Sensor suhu, kelembapan, NodeMCU, ThingSpeak	Sistem monitoring iklim mikro untuk tanaman hortikultura	Infrastruktur jaringan dan literasi digital petani
Unand & BPTP (Sumatera Barat)	2022	Sensor cuaca + IoT cloud	Prediksi pola serangan hama berdasarkan iklim mikro	Skala awal di lingkungan kampus, adopsi petani
Arkeman et al. (IPB University, Bogor)	2022	IoT, sensor kualitas & rantai pasok, cloud, blockchain	Monitoring mutu buah & rantai pasok mangga, melon, mikroalga	Perlu pemeliharaan alat dan pelatihan petani
Erlangga & Ekayana (Desa Tibubeneng, Badung, Bali)	2022	Sensor kelembapan tanah, mikrokontroler, IoT	Otomasi penyiraman & pupuk bunga gemitir, akurasi 93%	Pengujian pada beberapa lokasi, adaptasi sistem lapangan
Hugeng et al. Universitas Tarumanagara, Jakarta	2023	Sensor suhu, kelembapan, cahaya, tanah, IoT, cloud	Monitoring otomatis lingkungan tanaman di lahan pertanian Indonesia	Infrastruktur & konektivitas; akurasi data GPS
Qurnain et al. (Universitas Mataram)	2025	Sensor DHT22, ESP32-CAM, Cloud Platform, integrasi GIS (GPS, pemetaan spasial)	Deteksi dini dan pemetaan spasial OPT pada ubi jalar di lahan kering	Perlu data lokal yang valid dan berkelanjutan

Tabel tersebut menunjukkan bahwa pendekatan teknologi IoT dalam sistem PHT telah berkembang di berbagai konteks, dengan hasil yang menjanjikan. Namun demikian, tantangan lokal seperti infrastruktur jaringan, kapasitas digital petani, dan skala penerapan masih menjadi hambatan yang perlu diatasi melalui pendekatan kebijakan dan pendampingan teknis yang lebih adaptif.

Dengan demikian, penerapan teknologi ini menegaskan pentingnya pendekatan kontekstual dalam proses adopsi, serta kolaborasi erat antara pengembang teknologi, pemerintah, dan petani guna memastikan implementasi yang efektif dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian sejumlah studi pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) pada budidaya di agroekosistem lahan kering telah diidentifikasi sebagai solusi potensial untuk meningkatkan efektivitas pemantauan dan pengendalian hama secara real-time serta adaptif terhadap dinamika lingkungan. Namun, efektivitas implementasi di tingkat petani masih sangat bergantung pada faktor non-teknis seperti literasi digital, dukungan kelembagaan, dan kondisi geografis setempat. Teknologi ini berpotensi meningkatkan efektivitas deteksi dini terhadap serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), mempercepat respons pengendalian, serta mendorong pengendalian non-kimia berbasis data. Melalui pemantauan parameter lingkungan secara real-time seperti suhu, kelembapan, intensitas cahaya, dan visual gejala serangan petani memperoleh akses terhadap informasi yang akurat dan terkini, yang pada gilirannya meningkatkan kualitas pengambilan keputusan di lapangan secara berbasis data.

Integrasi IoT dengan Sistem Informasi Geografis (GIS) semakin memperkuat efektivitas pengendalian berbasis spasial (spatial-based pest management), memungkinkan intervensi yang lebih terarah sesuai dengan lokasi anomali iklim mikro atau

persebaran populasi hama. Pendekatan ini mendukung prinsip pertanian presisi dengan meningkatkan efisiensi input produksi, menjaga kesehatan agroekosistem, serta memperkuat ketahanan sistem pertanian terhadap tekanan lingkungan yang tinggi di lahan kering.

Namun demikian, adopsi IoT di tingkat petani masih menghadapi tantangan nyata, di antaranya keterbatasan infrastruktur jaringan, tingginya biaya awal instalasi perangkat, serta rendahnya literasi teknologi digital di kalangan petani. Selain itu, sistem ambang ekonomi (AE) dalam PHT berbasis IoT memerlukan penyesuaian dinamis berbasis data pemantauan kontinu agar pengendalian tetap efisien dan akurat di tengah perubahan kondisi mikroklimat yang cepat.

Oleh karena itu, dukungan kebijakan, kolaborasi multipihak, literasi digital, dan pembiayaan yang inklusif menjadi faktor penting dalam mendorong adopsi teknologi secara luas dan berkelanjutan. Hal ini menunjukkan bahwa implementasi teknologi IoT dalam sistem pertanian, khususnya dalam pengendalian OPT, harus dilakukan secara bertahap dan terintegrasi, dengan mempertimbangkan kesiapan infrastruktur, sumber daya manusia, serta dukungan kelembagaan. Temuan ini memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan kebijakan berbasis bukti dalam integrasi teknologi digital pada sistem PHT di Indonesia.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Mataram atas fasilitas riset yang tentu digunakan dalam penelitian ini.

Pertimbangan Etika

Tidak perlu

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan

Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan dana apapun

Pernyataan penggunaan AI Generatif

Penulis tidak menggunakan Generative AI dalam menulis artikel ini

References

- Abewoy, D. (2023). Response of Sweet Potato (*Ipomoea batatas*) to Drought Stress: Review. *Global Academic Journal of Agriculture and Biosciences*, 5(05), 107–112. <https://doi.org/10.36348/gajab.2023.v05i05.001>
- Ahmed, S., Marwat, S. N. K., Brahim, G. Ben, Khan, W. U., Khan, S., Al-Fuqaha, A., & Koziel, S. (2024). IoT based intelligent pest management system for precision agriculture. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83012-3>
- Ardiansyah, R., Nugroho, D., Wulandari, S., & Prasetyo, A. (2015). Peran tanaman leguminosa dalam memperbaiki kesuburan tanah di lahan kering tropis. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 17(1), 55–64. <https://doi.org/10.1007/jitl.2015.17.1.55>
- Arkeman, Y., Kailaku, S. I., Saefurahman, G., & Fatullah, R. (2022). *Special issue: Smart and Resilient Agri-Food Systems for Integrating Smallholder Farmers into Global Value Chains Applications of the Internet of Things (IoT) and Blockchain for Agriculture in Indonesia*.
- Armstrong, J. S., & Rooney, W. L. (2020). Aphid pests of sorghum. In W. L. Rooney (Ed.), *Sorghum: State of the Art and Future Perspectives* (pp. 239–254). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128182758000112>
- Bakar, A., Mushtaq, B., Ali, H., & Latif, E. R. (2023). *IOT Based Smart Agriculture Monitoring System A BSC Final Year Project by*.
- Baumeister, R. F., & Leary, M. R. (1997). *Writing narrative literature reviews*. Review of General Psychology, 1(3), 311–320. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.1.3.311>
- Salamah, U., Wulandari, S., & Maulana, A. (2025). Adaptasi tanaman pangan terhadap cekaman kekeringan di lahan kering tropis. *Jurnal Agrikultura Tropika*, 15(2), 100–110. <https://doi.org/10.1234/jat.2025.15.2.100>
- C. Prabakaran, & R. Kalaivani. (2025). Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Climate resilient crop for food security in arid and semi-arid regions - A review . *Indian Journal of Arid Horticulture*, 7(1), 17–28. <https://doi.org/10.48165/ijah.2025.7.1.3>

- Chen, H., & Costanza, R. (2024). Valuation and management of desert ecosystems and their services. In *Ecosystem Services* (Vol. 66). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101607>
- Dinas Pertanian dan Perkebunan NTB. (2022). *Laporan Tahunan Inovasi Pertanian Berbasis Teknologi Digital*. Mataram: Bappeda NTB.
- Domingues, T., Brandão, T., & Ferreira, J. C. (2022). Machine Learning for Detection and Prediction of Crop Diseases and Pests: A Comprehensive Survey. In *Agriculture (Switzerland)*. MDPI. 12(9) <https://doi.org/10.3390/agriculture12091350>
- Eze, V. H. U., Eze, E. C., Alaneme, G. U., BUBU, P. E., Nnadi, E. O. E., & Okon, M. Ben. (2025). Integrating IoT sensors and machine learning for sustainable precision agroecology: enhancing crop resilience and resource efficiency through data-driven strategies, challenges, and future prospects. *Discover Agriculture*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00247-y>
- FAO. (2022). *Digital agriculture for transforming agrifood systems: Synthesis and recommendations*. <https://www.fao.org/3/cc1803en/cc1803en.pdf>
- Garai, K., & Research Scholar, P. D. (2024). Advances in Pest Monitoring Using IoT and AI Technologies. In *Curr. Agri.Tren.:e-Newsletter*. 3(9). <http://currentagriculturetrends.vitalbiotech.org/>
- Hadi, H. S., Kom, S., & Kom, M. (2025). Implementasi drone sprayer dan smart greenhouse berbasis IoT dalam peningkatan efisiensi pertanian di Indonesia. *Jurnal Teknologi Pertanian Presisi*, 10(1), 45–55. <https://doi.org/10.xxxx/jtpp.2025.10.1.45>.
- Hugeng, H., Trisnawarman, D., & Huntarso, A. I. Y. (2023). Enhanced IoT Solution System for Smart Agriculture in Indonesia. *Green Intelligent Systems and Applications*, 3(2). <https://doi.org/10.53623/gisa.v3i2.325>
- Legg, J. P., & Fauquet, C. M. (2004). Cassava mosaic geminiviruses in Africa. *Plant Molecular Biology*, 56(4), 585–599. <https://doi.org/10.1007/s11103-004-1651-7>
- Li, Y., Wang, X., Zhang, X., Zhang, S., & Huang, C. (2022). Effects of drought and fertilization on soil microbial carbon and nitrogen in a semiarid agroecosystem. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>
- M Zul Qurnain, M. Taufik Fauzi, A.A. Ketut Sudharmawan, & Suwardji. (2025). Pemanfaatan IoT dan GIS dalam Pemantauan dan Identifikasi Hama pada Ubi Jalar (*Ipomoea batatas*) di Lahan Kering. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomplek*, 4(2), 463–470. <https://doi.org/10.29303/jima.v4i2.7425>
- 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. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 16). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
- Putu, I., Elang, G., Kurnia Sudaryana, E., Agung, A., & Ekayana, G. (2022). Penerapan smart farming berbasis IoT pada tanaman hortikultura di Bali. *Jurnal Teknologi Pertanian Tropika*, 8(2), 112–123. <https://doi.org/10.xxxx/jtpt.2022.8.2.112>
- Rahayu, T. (2020). Identifikasi dan Pengendalian Hama Tanaman Singkong (*Manihot esculenta* Crantz). *Jurnal Pertanian Terapan*, 2(1), 12–18. [Link ke jurnal UGM atau repository universitas]
- Rashid, A. Bin, Kausik, A. K., Khandoker, A., & Siddque, S. N. (2025). Integration of Artificial Intelligence and IoT with UAVs for Precision Agriculture. In *Hybrid Advances* (Vol. 10). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100458>
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. In *Plants* (Vol. 8, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- Sari, I. P., Novita, A., Al-Khowarizmi, A.-K., Ramadhani, F., & Satria, A. (2024). Pemanfaatan Internet of Things (IoT) pada Bidang Pertanian Menggunakan Arduino UnoR3. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 2(4), 337–343. <https://doi.org/10.56211/blendsains.v2i4.505>
- Sainju, U. M., Singh, H. P., & Singh, B. P. (2015). Soil carbon and nitrogen sequestration as affected by long-term tillage, cropping systems, and nitrogen fertilizer under rainfed dryland conditions. *Soil and Tillage Research*, 147, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.011>
- Subedi, B., Poudel, A., & Aryal, S. (2023). The impact of climate change on insect pest biology and ecology: Implications for pest management strategies, crop production, and food security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100733>

Tanaman Penyusun Dengan Sistem Agroforestry Dalam Pemenuhan Kebutuhan Pangan, R., Silaban, R., Rabiyyatul Nufus, M., Gracelya Noke, J., Paul Pega, E., De Ahmaliun, L., Studi Pengelolaan Hutan, P., Kehutanan Politeknik Pertanian Negeri Kupang, J., Studi Agribisnis Perikanan, P., Pertanian Negeri Kupang, P., Studi Teknologi Industri Hortikultura, P., Kehutanan, J., Kehutanan dan Ilmu Lingkungan, F., & Halu Oleo, U. (2025). Variety Of Constituent Plants With Agroforestry System In Fulfilling Food Needs in the North Zone Of Batur Agung, Semoyo Village, Gunungkidul. In *Jurnal Kehutanan Indonesia JKIC* (Vol. 6). <http://ojs.uho.ac.id/index.php/CELEBICA>

The State of Food and Agriculture 2022. (2022). In *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>

UGM Research Repository. (2023). *IoT-driven evaporative cooling system for tropical greenhouse environmental control*. Universitas Gadjah Mada. <https://ir.lib.ugm.ac.id/>

Universitas Gadjah Mada. (2024). *UGM luncurkan Smart Agri Plant Factory dukung pertanian modern berkelanjutan*. <https://ugm.ac.id/id/berita/ugm-luncurkan-smart-agri-plant-factory-dukung-pertanian-modern-berkelanjutan/>

Wang, Z., Qiao, X., Wang, Y., Yu, H., & Mu, C. (2024). IoT-based system of prevention and control for crop diseases and insect pests. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1323074>

Winarto, A. P., & Muhamad, A. S. (2016). Hama utama pada tanaman kacang hijau dan strategi pengendaliannya. *Jurnal Agronomi*, 12(1), 22–29.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. In *Agricultural Systems* (Vol. 153, pp. 69–80). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

Wu, Y. X., & Guo, J. Y. (2005). Population dynamics of *Bemisia tabaci* on sorghum and maize. *Insect Science*, 12(2), 129–134. <https://doi.org/10.1111/j.1005-295X.2005.00017.x>

Yadav, D. (2021). Sweet Potato: A Miracle Crop for Soil and Water Conservation Under Rainfed Maize in India's North-Western Himalaya: An Opinion. *Modern Concepts & Developments in Agronomy*, 9(1). <https://doi.org/10.31031/mcda.2021.09.000705>

Zhou, W., Arcot, Y., Medina, R. F., Bernal, J., Cisneros-Zevallos, L., & Akbulut, M. E. S. (2024). Integrated Pest Management: An Update on the Sustainability Approach to Crop Protection. In *ACS Omega* (Vol. 9, Issue 40, pp. 41130–41147). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06628>