



*Rudy C Tarumingkeng: **Manajemen Hama Modern Berbasis Teknologi -
Peluang dan Tantangan di Abad ke-21***

Oleh:

Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD

Professor of Management NUP: 9903252922

Professor Emeritus, IPB-University

Anggota MPR-RI, 1982-1987

Rektor, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988, dan

Rektor, Kampus AGRO Manokwari sekarang Universitas Papua Manokwari

Coordinator, CIDA/DIKTI SFU Burnaby BC Canada 1988-1991

Rektor, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta (1991-2000)

Ketua, Dewan Guru Besar, IPB-University, Bogor (2005-2006)

AI - Data Analyst, dan Ketua, Senat Akademik, IBM-ASMI, Jakarta 2024-

© RudyCT Academic Series

rudyclt75@gmail.com

16 April 2026

MANAJEMEN HAMA MODERN BERBASIS TEKNOLOGI: PELUANG DAN TANTANGAN DI ABAD KE-21

Abstrak

Manajemen hama modern sedang mengalami perubahan paradigmatik dari pendekatan reaktif berbasis penyemprotan pestisida menuju sistem pengelolaan yang prediktif, presisi, ekologis, dan berbasis data. Pada abad ke-21, tekanan terhadap sektor pertanian semakin kompleks karena perubahan iklim, intensifikasi pertanian, degradasi agroekosistem, resistensi hama terhadap pestisida, globalisasi perdagangan komoditas, serta meningkatnya tuntutan keamanan pangan dan keberlanjutan lingkungan. Dalam konteks tersebut, Pengelolaan Hama Terpadu atau *Integrated Pest Management* tetap menjadi fondasi utama karena menekankan pertumbuhan tanaman sehat, pemanfaatan mekanisme pengendalian alami, serta pengurangan gangguan terhadap agroekosistem. FAO menjelaskan IPM/PHT sebagai proses dinamis berbasis pendekatan ekosistem yang mempertimbangkan pilihan pengendalian hama berdasarkan aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. ([FAOHome](#))

Makalah ini membahas perkembangan manajemen hama modern berbasis teknologi dengan menyoroti sensor, Internet of Things, drone, citra multispektral, kecerdasan buatan, analitik data, perangkat pintar, biopestisida, RNA interference, CRISPR, mikrobioma tanaman, serta sistem peringatan dini. Teknologi-teknologi tersebut membuka peluang baru untuk mendeteksi hama lebih awal, memetakan sebaran serangan, memprediksi risiko, mengurangi aplikasi pestisida yang tidak perlu, memperbaiki efektivitas pengendalian, dan memperkuat ketahanan

pangan. Kajian mutakhir menunjukkan bahwa AI dapat meningkatkan akurasi identifikasi hama, deteksi penyakit tanaman, dan pengendalian gulma sehingga berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap input kimia. ([ScienceDirect](#))

Namun, kemajuan teknologi tidak otomatis menjamin keberhasilan. Tantangan utama terletak pada biaya, akses petani kecil, literasi digital, ketersediaan data lokal, infrastruktur konektivitas, validasi lapangan, keamanan data, regulasi, etika bioteknologi, dan risiko penggunaan teknologi untuk mempercepat pola lama yang tidak berkelanjutan. Dalam konteks Indonesia, PHT telah memiliki dasar kebijakan dan praktik lapangan yang kuat, termasuk prinsip bahwa pestisida kimia merupakan alternatif terakhir ketika populasi hama melampaui ambang ekonomi. ([bbpopt.tanamanpangan.pertanian.go.id](#)) Makalah ini menyimpulkan bahwa masa depan manajemen hama bukanlah sekadar adopsi alat canggih, melainkan pembangunan ekosistem keputusan yang mengintegrasikan sains, teknologi, petani, kelembagaan, pasar, dan etika ekologis.

Kata kunci: *manajemen hama modern, Pengelolaan Hama Terpadu, pertanian presisi, sensor, drone, kecerdasan buatan, analitik data, biopestisida, RNAi, CRISPR, Indonesia.*

Manajemen Hama Modern Berbasis Teknologi - Peluang dan Tantangan di Abad ke-21

1. Pendahuluan

Hama merupakan bagian tak terpisahkan dari sejarah pertanian manusia. Sejak manusia mulai membudidayakan tanaman secara menetap, tanaman pangan, hortikultura, perkebunan, dan tanaman industri selalu berhadapan dengan organisme yang memanfaatkan tanaman sebagai sumber makanan, tempat hidup, atau inang. Organisme pengganggu tanaman dapat berupa serangga, tungau, nematoda, jamur, bakteri, virus, gulma, moluska, bahkan vertebrata tertentu. Dalam kondisi tertentu, keberadaan organisme tersebut masih dapat ditoleransi oleh agroekosistem. Akan tetapi, ketika populasinya meningkat dan melampaui ambang kerugian ekonomi, hama berubah menjadi ancaman terhadap produktivitas, pendapatan petani, stabilitas harga pangan, dan ketahanan pangan nasional.

Pada era pertanian modern abad ke-20, pestisida kimia sintetis pernah dianggap sebagai simbol kemenangan ilmu pengetahuan atas hama. Pestisida memungkinkan pengendalian cepat dan tampak praktis. Namun pengalaman panjang menunjukkan bahwa ketergantungan berlebihan pada pestisida menimbulkan masalah baru: resistensi hama, ledakan hama sekunder, kematian musuh alami, pencemaran lingkungan, residu pada pangan, dan risiko kesehatan bagi petani. FAO bahkan menekankan bahwa IPM/PHT bertujuan mengintegrasikan berbagai teknik pengendalian agar populasi hama ditekan pada tingkat yang secara ekonomi dapat dibenarkan, sekaligus mengurangi risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. ([FAOHome](#))

Abad ke-21 memperluas kompleksitas tersebut. Perubahan iklim mengubah pola suhu, curah hujan, kelembapan, dan musim tanam. Kondisi ini dapat mempercepat siklus hidup serangga, memperluas wilayah sebaran hama, dan mengubah hubungan antara hama, tanaman, dan musuh alami. Globalisasi perdagangan mempercepat perpindahan organisme invasif antarwilayah. Intensifikasi pertanian dan monokultur memperbesar risiko ledakan populasi hama. Sementara itu, tuntutan

konsumen terhadap pangan aman, rendah residu, dan ramah lingkungan semakin meningkat.

Dalam konteks inilah manajemen hama modern berbasis teknologi menjadi penting. Teknologi tidak hanya dimaknai sebagai alat semprot yang lebih cepat, tetapi sebagai sistem pengetahuan dan keputusan. Sensor dapat membaca kondisi mikroklimat. Drone dapat memetakan kesehatan tanaman. Kecerdasan buatan dapat mengenali gejala hama dan penyakit dari citra digital. Analitik data dapat memprediksi risiko serangan. Biopestisida dan teknologi molekuler dapat menawarkan alternatif yang lebih spesifik. Semua teknologi ini dapat memperkuat PHT jika digunakan dengan benar.

Namun, perlu ditegaskan sejak awal bahwa teknologi bukan pengganti prinsip ekologis. Teknologi yang tidak ditempatkan dalam kerangka PHT justru dapat mempercepat praktik lama yang bermasalah. Drone sprayer, misalnya, dapat menjadi instrumen pertanian presisi jika digunakan untuk aplikasi selektif berbasis peta risiko. Tetapi drone juga dapat mempercepat penyemprotan rutin tanpa diagnosis jika hanya dipakai sebagai alat mekanisasi semata. Karena itu, masa depan manajemen hama menuntut keseimbangan antara inovasi teknologi dan kebijaksanaan ekologis.

2. Dari Pengendalian Hama Konvensional ke PHT Modern

Pengelolaan Hama Terpadu lahir sebagai kritik terhadap pendekatan pengendalian hama yang terlalu bergantung pada pestisida. PHT mengajarkan bahwa keberadaan hama tidak selalu harus direspons dengan penyemprotan. Keputusan pengendalian harus didasarkan pada pengamatan lapangan, identifikasi organisme, kondisi tanaman, keberadaan musuh alami, tingkat kerusakan, dan ambang ekonomi. Di Indonesia, BBPOPT Kementerian Pertanian menjelaskan bahwa pestisida kimia dalam PHT merupakan alternatif terakhir setelah teknik pengendalian lain tidak mampu menurunkan populasi hama yang telah melampaui

ambang ekonomi, ambang kendali, atau ambang tindakan.

(bbpopt.tanamanpangan.pertanian.go.id)

PHT modern memiliki karakter berbeda dari PHT generasi awal. PHT generasi awal banyak bertumpu pada pengamatan manual, sekolah lapang, identifikasi hama, pemanfaatan musuh alami, kultur teknis, dan pengendalian kimia selektif. PHT modern mempertahankan prinsip tersebut, tetapi memperkuatnya dengan teknologi digital, bioteknologi, dan analitik sistem. Dengan demikian, PHT tidak ditinggalkan, melainkan diperbarui.

Perubahan ini dapat dijelaskan dalam empat tahap evolusi. Tahap pertama adalah pengendalian tradisional berbasis pengalaman lokal, seperti rotasi tanaman, sanitasi lahan, tumpangsari, varietas lokal, tanaman refugia, dan penggunaan bahan nabati. Tahap kedua adalah era kimia, ketika pestisida sintetis menjadi instrumen dominan. Tahap ketiga adalah era PHT ekologis, ketika petani dan penyuluh mulai memahami pentingnya musuh alami, ambang ekonomi, dan pengendalian selektif. Tahap keempat adalah era PHT digital, ketika pengamatan lapangan diperkuat sensor, citra, data, AI, dan sistem peringatan dini.

Pergeseran ini bukan hanya perubahan alat, tetapi perubahan cara berpikir. Dalam pendekatan lama, pertanyaan petani sering berbunyi: "Pestisida apa yang harus digunakan?" Dalam pendekatan PHT modern, pertanyaannya menjadi lebih luas: "Apakah hama benar-benar melampaui ambang kendali? Apakah musuh alami masih cukup? Area mana yang terserang? Apakah tindakan non-kimia masih memungkinkan? Apakah penyemprotan diperlukan secara lokal atau menyeluruh? Apa risiko ekologis dan ekonominya?" Pertanyaan-pertanyaan inilah yang membuat PHT modern menjadi sistem manajemen, bukan sekadar teknik pertanian.

3. Sensor dan Internet of Things sebagai Indra Digital Lahan

Sensor adalah salah satu fondasi utama manajemen hama modern. Dalam pertanian presisi, sensor berfungsi sebagai “indra digital” yang membaca kondisi agroekosistem secara terus-menerus. Sensor dapat mengukur suhu udara, kelembapan udara, kelembapan tanah, suhu tanah, curah hujan, intensitas cahaya, kelembapan daun, pH tanah, konduktivitas listrik, kandungan hara, dan kecepatan angin. Data ini sangat penting karena banyak hama dan penyakit berkembang dalam rentang lingkungan tertentu.

Sebagai contoh, penyakit jamur sering meningkat pada kondisi kelembapan tinggi dan periode basah daun yang panjang. Serangga tertentu berkembang lebih cepat pada suhu hangat. Kutu, trips, dan beberapa vektor virus dapat meningkat pada kondisi kering tertentu. Dengan sensor, petani dapat mengetahui bukan hanya bahwa tanaman telah terserang, tetapi bahwa kondisi lahan sedang memasuki zona risiko. Inilah perubahan dari deteksi kerusakan menuju deteksi risiko.

Internet of Things atau IoT memungkinkan sensor terhubung dengan platform digital. Data dari sensor di lahan dapat dikirim ke aplikasi ponsel, dashboard kelompok tani, atau pusat data pertanian. BRIN mencatat bahwa konsep pertanian cerdas melibatkan sensor, sistem pengelolaan data, perangkat IoT, drone, dan kecerdasan buatan. ([BRIN - Badan Riset dan Inovasi Nasional](#)) Dengan konektivitas ini, manajemen hama tidak lagi hanya berdasarkan pengamatan sesekali, tetapi berdasarkan aliran data yang berkelanjutan.

Sensor juga dapat dipadukan dengan perangkat pintar. Perangkat hama yang dilengkapi kamera dan koneksi data dapat memotret serangga yang tertangkap, lalu sistem AI menghitung dan mengklasifikasikan jenisnya. Dengan demikian, populasi hama dapat dipantau tanpa harus selalu menghitung manual. Dalam sistem yang lebih maju, perangkat pintar dapat mengirim peringatan ketika populasi hama meningkat melewati ambang tertentu.

Namun, penggunaan sensor tidak bebas masalah. Sensor membutuhkan biaya, pemeliharaan, kalibrasi, listrik, jaringan internet, dan kemampuan membaca data. Sensor yang tidak dikalibrasi dapat menghasilkan data keliru. Data yang banyak tetapi tidak dipahami dapat menimbulkan kebingungan. Oleh karena itu, sensor harus dihubungkan dengan protokol keputusan. Petani tidak hanya perlu tahu bahwa kelembapan naik, tetapi juga apa arti kenaikan itu bagi risiko hama atau penyakit.

Dalam konteks Indonesia, sensor paling realistis diterapkan secara bertahap. Pada tahap awal, kelompok tani dapat menggunakan sensor iklim sederhana di titik representatif. Data dapat dibaca bersama penyuluh dalam forum mingguan. Pada tahap berikutnya, sensor dapat dihubungkan dengan aplikasi dan dashboard. Dengan pendekatan kolektif, biaya dapat dibagi dan manfaatnya dirasakan bersama.

4. Drone sebagai Mata Udara Pertanian Modern

Drone atau UAV telah menjadi teknologi penting dalam pertanian presisi. Dalam manajemen hama, drone memiliki dua fungsi utama: pemantauan dan aplikasi. Fungsi pemantauan dilakukan melalui kamera RGB, multispektral, termal, atau hiperspektral untuk membaca kondisi tanaman dari udara. Fungsi aplikasi dilakukan melalui drone sprayer untuk menyemprotkan bahan pengendali secara lebih cepat dan terarah.

Keunggulan utama drone adalah kemampuannya memetakan lahan luas dalam waktu singkat. Pengamatan manual sering terbatas oleh tenaga, waktu, dan akses medan. Drone dapat melihat pola spasial yang sulit ditangkap dari permukaan tanah. Misalnya, area tanaman yang menguning, pertumbuhan yang tidak seragam, stres air, kerusakan daun, atau hotspot serangan hama dapat terlihat lebih cepat dari udara. Kajian mutakhir mengenai UAV dan pembelajaran mendalam menunjukkan bahwa penginderaan jauh berbasis drone dapat menjadi metode yang efisien,

tepat waktu, dan akurat untuk monitoring hama serta penyakit tanaman.
([Springer](#))

Di Indonesia, pemanfaatan drone pertanian mulai masuk dalam kebijakan dan praktik modernisasi pertanian. Kementerian Pertanian menyebut drone telah diterapkan untuk pengendalian OPT pada padi, jagung, dan kedelai, serta direncanakan diperluas ke pemupukan dan penyebaran benih dalam program pertanian modern. (bbpopt.tanamanpangan.pertanian.go.id) Kementan juga melaporkan pelibatan petani dan personel Brigade Pangan dalam pengoperasian drone pertanian di Kapuas, Kalimantan Tengah, sebagai bagian dari modernisasi mekanisasi. (serealia.brmp.pertanian.go.id)

Meskipun demikian, drone bukan solusi otomatis. Drone pemantauan menghasilkan citra, tetapi citra harus ditafsirkan. Warna tanaman yang berubah belum tentu disebabkan hama; bisa juga karena kekurangan hara, kekeringan, penyakit, genangan, atau kerusakan mekanis. Karena itu, drone memberi indikasi awal, tetapi diagnosis tetap harus dikonfirmasi di lapangan.

Drone sprayer juga memerlukan standar operasi ketat. Efektivitas penyemprotan bergantung pada tinggi terbang, kecepatan, ukuran droplet, tekanan nozzle, arah angin, jenis formulasi, struktur kanopi, dan dosis aplikasi. Jika tidak dikalibrasi, penyemprotan dapat tidak merata atau menimbulkan drift. Maka, drone harus menjadi bagian dari PHT presisi, bukan sekadar alat penyemprotan massal.

5. Kecerdasan Buatan dan Analitik Data dalam Deteksi Hama

Kecerdasan buatan atau AI mengubah manajemen hama dari pendekatan berbasis intuisi menuju pendekatan berbasis pola. AI dapat digunakan untuk mengenali hama dari citra, mendeteksi penyakit daun, menghitung jumlah serangga pada perangkat, memprediksi risiko ledakan hama, dan memberikan rekomendasi tindakan. Kajian tentang AI dalam perlindungan tanaman menyatakan bahwa AI dapat meningkatkan akurasi identifikasi

hama, deteksi penyakit tanaman, dan pengendalian gulma, sehingga berpotensi mengurangi ketergantungan pada input kimia. ([ScienceDirect](#))

Analitik data bekerja dalam beberapa tingkat. Pertama, analitik deskriptif menjawab apa yang terjadi: misalnya populasi hama naik, kelembapan meningkat, atau area tertentu menunjukkan stres tanaman. Kedua, analitik diagnostik menjawab mengapa hal itu terjadi: misalnya karena cuaca lembap, varietas rentan, pemupukan nitrogen berlebihan, atau kurangnya musuh alami. Ketiga, analitik prediktif menjawab apa yang mungkin terjadi: misalnya risiko serangan meningkat dalam tujuh hari ke depan. Keempat, analitik preskriptif menjawab apa yang sebaiknya dilakukan: misalnya menambah pengamatan, memasang perangkap, melepas musuh alami, menggunakan biopestisida, atau menyemprot secara selektif.

Dalam sistem PHT digital, AI seharusnya memperkuat keputusan petani. AI dapat memberi peringatan, tetapi tidak boleh menjadi otoritas tunggal tanpa validasi agronomis. Model AI dapat salah jika data pelatihannya tidak mewakili kondisi lokal. Foto daun yang buram, cahaya berlebihan, varietas berbeda, gejala campuran, atau hama pada fase berbeda dapat menyebabkan kesalahan identifikasi. Oleh sebab itu, AI harus dikembangkan dengan data lokal Indonesia, dikalibrasi secara berkala, dan diverifikasi oleh ahli serta penyuluh.

Bagi petani kecil, AI yang paling berguna bukanlah sistem rumit, tetapi aplikasi sederhana yang mampu menjawab kebutuhan praktis: hama apa ini, seberapa parah serangannya, apakah perlu tindakan, dan tindakan apa yang paling aman. Aplikasi seperti ini harus menggunakan bahasa Indonesia dan, jika mungkin, bahasa lokal. Ia juga harus bekerja dalam kondisi internet terbatas.

6. Citra Multispektral, Hiperspektral, dan Deteksi Dini Stres Tanaman

Salah satu kekuatan pertanian presisi adalah kemampuan melihat sesuatu yang belum tampak oleh mata manusia. Citra multispektral dan

hiperspektral mampu menangkap pantulan cahaya tanaman pada berbagai panjang gelombang. Tanaman yang mengalami stres akibat hama, penyakit, kekurangan air, atau kekurangan hara sering menunjukkan perubahan fisiologis sebelum gejala visual tampak jelas.

Indeks vegetasi seperti NDVI, NDRE, atau indeks lain dapat digunakan untuk menilai kesehatan tanaman. Jika suatu area menunjukkan penurunan indeks vegetasi, petani dapat memeriksa titik tersebut lebih awal. Dalam konteks manajemen hama, ini penting karena pengendalian dini biasanya lebih murah dan lebih efektif daripada pengendalian setelah serangan meluas.

Namun, citra spektral tidak selalu spesifik. Penurunan kesehatan tanaman dapat disebabkan banyak faktor. Karena itu, citra harus digabungkan dengan data lain: pengamatan lapangan, sensor mikroklimat, data cuaca, fase pertumbuhan tanaman, riwayat pemupukan, dan populasi hama. Manajemen hama modern bukan hanya mengandalkan satu sumber data, tetapi mengintegrasikan banyak sumber data menjadi diagnosis yang lebih kuat.

Dalam praktik Indonesia, citra drone dapat sangat berguna untuk komoditas skala luas seperti padi, jagung, tebu, kelapa sawit, kakao, dan hortikultura dataran tinggi. Akan tetapi, biaya kamera multispektral masih relatif tinggi. Karena itu, model layanan bersama oleh koperasi, BUMDes, perguruan tinggi, perusahaan jasa agritech, atau dinas pertanian dapat menjadi pilihan realistis.

7. Biopestisida dan Agen Hayati sebagai Pilar Ekologi Modern

Manajemen hama modern tidak hanya identik dengan digitalisasi. Salah satu perkembangan penting justru berasal dari biologi: biopestisida dan agen hayati. Biopestisida dapat berasal dari mikroorganisme, metabolit alami, ekstrak tumbuhan, atau bahan biologis lain. Agen hayati seperti *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Trichoderma*, *Bacillus*

thuringiensis, parasitoid, predator, dan nematoda entomopatogen berperan penting dalam menekan hama dan penyakit.

Keunggulan biopestisida adalah relatif lebih kompatibel dengan PHT karena banyak yang lebih selektif dan lebih ramah terhadap musuh alami dibanding pestisida kimia spektrum luas. Selain itu, biopestisida dapat membantu mengurangi risiko residu. Dalam konteks PHT Indonesia, Ditjen Perkebunan menekankan bahwa PHT memadukan taktik pengendalian dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, ekologi, dan sosial, serta menempatkan pengendalian kimia sebagai alternatif terakhir ketika kerusakan mencapai ambang ekonomi. (ditjenbun.pertanian.go.id)

Namun, biopestisida juga menghadapi tantangan. Efektivitasnya sangat dipengaruhi kelembapan, suhu, sinar ultraviolet, cara aplikasi, kualitas formulasi, dan umur simpan. Produk yang berhasil di laboratorium belum tentu berhasil di lahan jika formulasi buruk atau aplikasi tidak tepat. Oleh sebab itu, pengembangan biopestisida memerlukan riset formulasi, standar mutu, distribusi dingin bila diperlukan, pelatihan aplikasi, dan evaluasi lapangan.

Teknologi digital dapat memperkuat biopestisida. Sensor dapat menentukan kapan kondisi lingkungan paling sesuai untuk aplikasi jamur entomopatogen. Drone dapat membantu aplikasi pada area tertentu. Analitik data dapat mengevaluasi efektivitas setelah aplikasi. Dengan demikian, biopestisida dan teknologi digital bukan dua jalur terpisah, melainkan dapat saling melengkapi.

8. RNA Interference sebagai Biopestisida Molekuler

RNA interference atau RNAi merupakan teknologi molekuler yang menarik dalam manajemen hama abad ke-21. RNAi bekerja dengan membungkam ekspresi gen tertentu pada organisme target. Dalam konteks hama, molekul double-stranded RNA dapat dirancang untuk menargetkan gen penting yang berkaitan dengan kelangsungan hidup, reproduksi, atau

perkembangan hama. Ketika gen tersebut dibungkam, hama dapat melemah atau mati.

Kajian mutakhir menyebut RNAi-based pesticides sebagai pendekatan presisi yang menggunakan dsRNA untuk membungkam gen esensial pada hama. ([Wiley Online Library](#)) Potensi utama RNAi adalah spesifisitas. Secara teoritis, dsRNA dapat dirancang agar menargetkan spesies hama tertentu, sehingga mengurangi dampak terhadap organisme bukan sasaran. Ini sangat sesuai dengan semangat PHT, yaitu mengendalikan hama tanpa merusak keseimbangan agroekosistem.

Namun, RNAi masih menghadapi berbagai tantangan. Pertama, stabilitas dsRNA di lingkungan dapat terganggu oleh sinar matahari, enzim, dan kondisi cuaca. Kedua, efektivitas penyerapan dsRNA berbeda antarspesies hama. Ketiga, biaya produksi harus cukup rendah agar layak bagi petani. Keempat, perlu evaluasi dampak bukan sasaran. Kelima, regulasi harus menentukan bagaimana produk RNAi dinilai dari sisi keamanan, efektivitas, dan lingkungan.

Dalam konteks Indonesia, RNAi masih lebih relevan sebagai agenda riset dan masa depan, bukan solusi massal jangka pendek. Namun, perguruan tinggi, BRIN, dan lembaga riset pertanian perlu mulai memahami teknologi ini agar Indonesia tidak hanya menjadi pasar teknologi, tetapi juga dapat mengembangkan kapasitas ilmiah sendiri.

9. CRISPR, Pengeditan Gen, dan Ketahanan Tanaman

CRISPR-Cas adalah teknologi pengeditan gen yang memungkinkan perubahan materi genetik secara lebih presisi. Dalam pertanian, CRISPR dapat digunakan untuk mengembangkan tanaman yang lebih tahan terhadap hama atau penyakit, memperbaiki sifat agronomis, atau memahami fungsi gen yang terlibat dalam interaksi tanaman-hama. Kajian tentang CRISPR dalam pertanian menunjukkan bahwa teknologi ini digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari adaptasi tanaman terhadap

perubahan iklim hingga peningkatan ketahanan dan efisiensi produksi.

([Innovative Genomics Institute \(IGI\)](#))

Dalam manajemen hama, CRISPR dapat berperan pada dua arah. Pertama, memperkuat tanaman. Misalnya, gen yang membuat tanaman rentan terhadap patogen dapat dimodifikasi agar tanaman menjadi lebih tahan. Kedua, mempelajari atau mengubah hama. Pengeditan gen pada serangga dapat membantu memahami gen reproduksi, perilaku, resistensi, dan perkembangan. Tinjauan ilmiah tentang genome editing untuk pengendalian hama membahas potensi CRISPR/Cas9, gene drive, serta tantangan seperti efek off-target, delivery, biosafety, dan tata kelola bertahap. ([ScienceDirect](#))

Namun, CRISPR juga membawa perdebatan etis dan ekologis. Jika teknologi digunakan untuk tanaman, pertanyaannya berkaitan dengan regulasi benih, keamanan pangan, dan penerimaan publik. Jika teknologi digunakan untuk mengubah populasi hama di alam, terutama melalui gene drive, pertanyaannya jauh lebih kompleks: bagaimana dampaknya terhadap ekosistem, bagaimana jika gen menyebar lintas wilayah, siapa yang berwenang memberi izin, dan bagaimana pemantauan jangka panjang dilakukan?

Karena itu, CRISPR dalam manajemen hama harus ditempatkan dalam prinsip kehati-hatian. Teknologi ini menjanjikan, tetapi tidak boleh diposisikan sebagai "solusi ajaib". Dalam kerangka PHT, CRISPR adalah salah satu instrumen ilmiah yang harus dikaji bersama instrumen lain, bukan pengganti keseluruhan sistem ekologis.

10. Mikrobioma Tanaman dan Kesehatan Agroekosistem

Kemajuan biologi modern menunjukkan bahwa tanaman tidak hidup sendiri. Tanaman hidup bersama komunitas mikroorganisme di akar, daun, batang, dan tanah sekitarnya. Komunitas ini disebut mikrobioma tanaman. Mikrobioma dapat membantu tanaman menyerap hara, menekan patogen,

merangsang sistem pertahanan, dan meningkatkan toleransi terhadap stres.

Dalam manajemen hama modern, mikrobioma mengubah fokus dari “membunuh hama” menjadi “membangun kesehatan sistem”. Tanah yang kaya bahan organik, memiliki keragaman mikroba, dan tidak rusak oleh input berlebihan dapat menjadi benteng biologis terhadap penyakit. Kompos, pupuk hayati, rotasi tanaman, tanaman penutup tanah, pengurangan pestisida spektrum luas, dan agroforestri dapat mendukung mikrobioma yang lebih sehat.

Teknologi digital dapat membantu memantau kesehatan agroekosistem, tetapi prinsip dasarnya tetap ekologis. Sensor tanah, analisis laboratorium, dan data hasil panen dapat digunakan untuk memahami hubungan antara kesehatan tanah dan risiko hama. Jika suatu lahan terus-menerus mengalami ledakan penyakit akar, masalahnya mungkin bukan hanya patogen, tetapi juga bahan organik rendah, drainase buruk, atau mikrobioma tidak seimbang.

Bagi Indonesia, pendekatan mikrobioma sangat relevan karena banyak lahan pertanian tropis mengalami tekanan intensifikasi, erosi, kehilangan bahan organik, dan degradasi tanah. Manajemen hama modern harus memasukkan kesehatan tanah sebagai komponen utama, bukan hanya fokus pada serangga di atas permukaan tanaman.

11. Sistem Peringatan Dini Hama

Salah satu peluang terbesar teknologi abad ke-21 adalah pembangunan sistem peringatan dini hama. Sistem ini menggabungkan data cuaca, sensor lapangan, citra drone, citra satelit, laporan petani, laporan penyuluh, perangkat pintar, dan model prediktif. Tujuannya adalah memberi peringatan sebelum serangan menjadi berat.

Sistem peringatan dini sangat penting karena hama bersifat dinamis. Populasi hama dapat meningkat cepat jika kondisi lingkungan mendukung. Dengan data historis dan prediksi cuaca, sistem dapat memberi sinyal risiko. Petani kemudian dapat meningkatkan pengamatan, memasang perangkat, memperkuat sanitasi, atau menyiapkan pengendalian hayati sebelum kerusakan meluas.

Dalam konteks Indonesia, sistem peringatan dini perlu dibangun secara berjenjang. Di tingkat desa, data dikumpulkan oleh petani dan penyuluh. Di tingkat kecamatan atau kabupaten, data dianalisis untuk melihat pola spasial. Di tingkat provinsi dan nasional, data digunakan untuk memetakan risiko, mengatur logistik pengendalian, dan membuat kebijakan. Kementerian Pertanian melalui BBPOPT selama ini memiliki peran penting dalam pengamatan, peramalan, dan pengendalian OPT; peran ini dapat diperkuat dengan integrasi digital.

Namun, sistem peringatan dini tidak boleh menjadi sistem satu arah dari pusat ke petani. Data petani harus dihargai sebagai sumber pengetahuan. Petani tidak hanya penerima peringatan, tetapi juga penghasil data. Dengan demikian, sistem menjadi partisipatif dan lebih akurat.

12. Peluang Manajemen Hama Modern

Peluang pertama adalah peningkatan akurasi diagnosis. Banyak kegagalan pengendalian terjadi karena salah mengenali penyebab kerusakan. Gejala daun menguning, misalnya, dapat disebabkan hama, penyakit, kekurangan hara, kekeringan, genangan, atau toksisitas. Dengan kombinasi citra, sensor, AI, dan validasi lapangan, diagnosis dapat menjadi lebih baik.

Peluang kedua adalah pengurangan penggunaan pestisida. Jika petani mengetahui area yang benar-benar terserang dan waktu yang tepat untuk bertindak, penyemprotan menyeluruh dapat dikurangi. Ini menurunkan biaya, residu, dan risiko ekologis. Namun, pengurangan ini hanya terjadi

jika teknologi digunakan dalam kerangka PHT, bukan untuk mempercepat penyemprotan rutin.

Peluang ketiga adalah perlindungan musuh alami. Aplikasi selektif berbasis data membantu mempertahankan predator dan parasitoid. Musuh alami adalah aset ekologis gratis yang sering rusak oleh pestisida spektrum luas. PHT modern harus menjadikan konservasi musuh alami sebagai indikator keberhasilan, bukan sekadar hasil panen.

Peluang keempat adalah efisiensi tenaga kerja. Drone, sensor, dan perangkat pintar dapat mengurangi beban pengamatan manual, terutama pada lahan luas. Ini penting ketika tenaga kerja pertanian semakin terbatas dan usia petani meningkat.

Peluang kelima adalah regenerasi pertanian. Teknologi dapat menarik minat generasi muda untuk masuk ke sektor pertanian sebagai operator drone, analis data, teknisi sensor, pengembang aplikasi, penyuluh digital, dan wirausahawan agritech.

Peluang keenam adalah peningkatan daya saing produk. Produk pertanian yang lebih rendah residu, terdokumentasi, dan dikelola secara presisi dapat memiliki nilai pasar lebih tinggi. Dalam perdagangan global, jejak digital praktik budidaya dapat menjadi bagian dari standar kualitas.

13. Tantangan Ekonomi dan Akses Petani Kecil

Tantangan terbesar dalam adopsi teknologi adalah biaya. Banyak petani Indonesia memiliki lahan kecil dan modal terbatas. Membeli drone, sensor, kamera multispektral, atau langganan platform analitik mungkin tidak realistis bagi petani individual. Karena itu, model kepemilikan individu bukan satu-satunya jalan.

Model yang lebih cocok adalah layanan bersama. Koperasi, kelompok tani, BUMDes, unit jasa alsintan, perguruan tinggi, startup agritech, atau pemerintah daerah dapat menyediakan layanan drone dan sensor. Petani

membayar berdasarkan jasa, bukan membeli alat. Model ini lebih inklusif dan memungkinkan teknologi digunakan pada skala ekonomi yang layak.

Tantangan lain adalah biaya tersembunyi. Alat membutuhkan perawatan, baterai, pembaruan perangkat lunak, kalibrasi, pelatihan operator, dan penggantian komponen. Jika hal ini tidak dihitung, proyek teknologi mudah berhenti setelah masa demonstrasi selesai.

Oleh karena itu, setiap program teknologi hama harus disertai analisis kelayakan ekonomi. Pertanyaannya bukan hanya "apakah teknologi ini canggih?", tetapi "apakah teknologi ini memberi manfaat bersih bagi petani?" Manfaat tersebut dapat berupa pengurangan biaya pestisida, peningkatan hasil, pengurangan kehilangan panen, peningkatan kualitas, atau akses pasar.

14. Tantangan Literasi Digital dan Penyuluhan

Teknologi hanya berguna jika dipahami. Banyak petani memiliki pengalaman ekologis yang kaya, tetapi belum tentu terbiasa membaca dashboard digital, indeks vegetasi, atau rekomendasi AI. Sebaliknya, banyak pengembang teknologi memahami perangkat lunak, tetapi kurang memahami realitas lahan. Kesenjangan ini harus dijembatani oleh penyuluhan modern.

Penyuluh pertanian masa depan perlu menguasai dua bahasa: bahasa ekologi dan bahasa digital. Mereka harus mampu menjelaskan apa arti data sensor, bagaimana membaca peta drone, mengapa AI perlu divalidasi, dan kapan pestisida boleh digunakan. Penyuluh juga harus mampu menjaga agar petani tidak menjadi pengguna pasif teknologi.

Sekolah Lapang PHT dapat diperbarui menjadi Sekolah Lapang PHT Digital. Petani tetap melakukan pengamatan lapangan, tetapi dibantu aplikasi pencatatan, foto digital, perangkat pintar, dan diskusi berbasis data.

Prinsipnya tetap sama: petani belajar dari agroekosistem. Perbedaannya, agroekosistem kini dibaca dengan bantuan alat digital.

15. Tantangan Data, Privasi, dan Kedaulatan Digital

Data pertanian adalah aset strategis. Data tentang lokasi lahan, serangan hama, produktivitas, penggunaan pestisida, jenis varietas, dan kondisi tanah dapat bernilai ekonomi tinggi. Jika data ini dikuasai pihak tertentu tanpa perlindungan petani, digitalisasi dapat menciptakan ketimpangan baru.

Pertanyaan penting harus diajukan: siapa pemilik data lahan? Apakah petani memberi persetujuan atas penggunaan data? Apakah data dapat dijual kepada perusahaan input, asuransi, bank, atau pembeli komoditas? Apakah petani mendapatkan manfaat dari data yang mereka hasilkan? Bagaimana keamanan data dijaga?

Manajemen hama modern membutuhkan tata kelola data yang adil. Prinsipnya, data harus memperkuat petani, bukan mengekstraksi nilai dari petani. Pemerintah perlu mengembangkan kerangka perlindungan data pertanian, standar interoperabilitas, dan mekanisme berbagi data yang aman. Perguruan tinggi dan lembaga riset dapat berperan sebagai penjaga etika dan kualitas data.

16. Tantangan Regulasi dan Keamanan Teknologi

Drone, AI, RNAi, CRISPR, dan biopestisida memerlukan regulasi yang berbeda-beda. Drone berkaitan dengan keselamatan penerbangan, izin operasi, keselamatan operator, dan drift aplikasi. AI berkaitan dengan akurasi rekomendasi, transparansi algoritma, dan tanggung jawab jika terjadi kesalahan. Biopestisida berkaitan dengan mutu, keamanan, dan efektivitas. RNAi dan CRISPR berkaitan dengan biosafety, dampak bukan sasaran, dan penerimaan sosial.

Regulasi yang terlalu longgar dapat menimbulkan risiko lingkungan dan sosial. Sebaliknya, regulasi yang terlalu kaku dapat menghambat inovasi. Karena itu, diperlukan regulasi adaptif berbasis risiko. Teknologi dengan risiko rendah dapat diproses lebih sederhana, sedangkan teknologi dengan risiko ekologis tinggi harus diuji secara ketat.

Dalam konteks Indonesia, dasar PHT telah diperkuat melalui kebijakan pertanian berkelanjutan dan prinsip penggunaan pestisida secara bijaksana. Ditjen Perkebunan menyebut bahwa PHT di Indonesia diamanahkan dalam sistem budidaya pertanian berkelanjutan dan didasarkan pada pertimbangan sosial, ekologi, serta efisiensi ekonomi. (ditjenbun.pertanian.go.id) Tantangannya adalah memperbarui kerangka tersebut agar mampu mengakomodasi teknologi digital dan bioteknologi modern.

17. Risiko Teknologi: Ketika Alat Canggih Memperkuat Praktik Lama

Salah satu risiko besar adalah *technological lock-in*, yaitu ketika teknologi baru justru memperkuat pola lama. Drone sprayer, misalnya, dapat membuat penyemprotan lebih mudah, cepat, dan luas. Jika tidak dikaitkan dengan ambang kendali, drone dapat memperbanyak aplikasi pestisida, bukan mengurangnya. AI rekomendasi input juga dapat bias jika dikembangkan oleh perusahaan yang berkepentingan menjual produk tertentu.

Sensor pun dapat menciptakan ilusi presisi jika data tidak akurat atau tidak dipahami. Dashboard yang indah tidak selalu berarti keputusan yang baik. Teknologi dapat menampilkan angka, tetapi interpretasi tetap membutuhkan pengetahuan agronomi. Karena itu, indikator keberhasilan manajemen hama modern tidak boleh hanya berupa jumlah drone yang dibeli atau sensor yang dipasang. Indikatornya harus mencakup pengurangan serangan, peningkatan hasil, penurunan biaya, pengurangan residu, perlindungan musuh alami, dan peningkatan kapasitas petani.

Dengan kata lain, teknologi harus diaudit secara ekologis dan sosial. Apakah teknologi benar-benar memperbaiki PHT? Apakah petani lebih mandiri? Apakah lingkungan lebih sehat? Apakah biaya lebih efisien? Apakah risiko pestisida menurun? Pertanyaan-pertanyaan ini harus menjadi bagian dari evaluasi.

18. Studi Kasus Naratif: Padi dan Drone PHT

Bayangkan sebuah hamparan padi di daerah sentra produksi. Pada pola lama, petani sering menyemprot berdasarkan jadwal atau kekhawatiran. Ketika melihat beberapa serangga, mereka segera membeli insektisida. Namun, penyemprotan rutin dapat membunuh laba-laba, kumbang predator, dan parasitoid. Setelah musuh alami berkurang, wereng atau hama lain justru dapat meningkat.

Dalam model PHT modern, kelompok tani menggunakan drone untuk memetakan area yang menunjukkan stres. Data drone menunjukkan beberapa titik tanaman menguning. Penyuluh bersama petani memeriksa lokasi tersebut. Ternyata sebagian disebabkan genangan, sebagian akibat kekurangan nitrogen, dan hanya sebagian kecil yang menunjukkan populasi hama meningkat. Keputusan kemudian berbeda untuk tiap lokasi: perbaikan drainase, koreksi pemupukan, dan pengendalian selektif pada titik hama.

Dalam skenario ini, drone bukan alat untuk menyemprot semua lahan, melainkan alat untuk memilah masalah. Nilai utamanya bukan pada mesin terbang, tetapi pada keputusan yang lebih tepat. Inilah contoh bagaimana teknologi memperkuat PHT.

19. Studi Kasus Naratif: Cabai, Sensor, dan Perangkat Pintar

Pada sentra cabai, petani menghadapi serangan trips, kutu kebul, tungau, antraknosa, dan virus. Karena cabai bernilai ekonomi tinggi, petani

cenderung menyemprot intensif untuk menghindari gagal panen. Namun, biaya pestisida membengkak dan risiko residu meningkat.

Dalam model modern, kelompok tani memasang sensor iklimat dan perangkat kuning berkamera. Sensor menunjukkan kelembapan tinggi selama beberapa hari. Perangkat mencatat peningkatan kutu kebul. Aplikasi memberi peringatan bahwa risiko penyakit virus yang ditularkan vektor meningkat. Petani kemudian melakukan pengamatan daun muda, memasang perangkat tambahan, membersihkan gulma inang, dan hanya menggunakan pestisida selektif pada area yang melewati ambang kendali.

Hasilnya bukan sekadar pengurangan pestisida, tetapi perubahan budaya keputusan. Petani tidak lagi bertanya "kapan semprot?", tetapi "apa bukti bahwa kita perlu bertindak?" Perubahan pertanyaan ini adalah inti manajemen hama modern.

20. Studi Kasus Naratif: Kopi dan Sistem Monitoring Kawasan

Pada kebun kopi rakyat, penggerek buah kopi sering sulit dikendalikan karena larva berada di dalam buah. Penyemprotan kimia tidak selalu efektif. Dalam PHT modern, pengendalian dilakukan melalui sanitasi buah terserang, pengaturan naungan, perangkat atraktan, konservasi musuh alami, dan monitoring populasi.

Teknologi dapat memperkuat sistem ini. Petani menggunakan aplikasi sederhana untuk mencatat tingkat serangan per blok kebun. Drone membantu memetakan kondisi tajuk dan akses kebun. Data kelompok tani menunjukkan area tertentu selalu menjadi sumber serangan. Kelompok kemudian melakukan sanitasi bersama dan memasang perangkat lebih rapat di area tersebut. Dengan pendekatan kawasan, pengendalian menjadi lebih efektif dibanding tindakan individual terpisah.

Kasus ini menunjukkan bahwa teknologi tidak selalu harus paling mahal. Bahkan pencatatan digital sederhana dapat memperbaiki koordinasi kelompok tani jika digunakan konsisten.

21. Implikasi bagi Manajemen dan Kebijakan Publik

Dari perspektif manajemen, hama bukan hanya masalah teknis pertanian, tetapi masalah sistem. Ia melibatkan input, informasi, perilaku petani, pasar, regulasi, iklim, dan kelembagaan. Oleh sebab itu, manajemen hama modern membutuhkan pendekatan lintas disiplin.

Pertama, perlu manajemen data. Data hama harus dikumpulkan, diverifikasi, disimpan, dianalisis, dan dibagikan dengan benar. Kedua, perlu manajemen risiko. Pemerintah dan petani harus mampu memetakan wilayah rawan, menyiapkan logistik, dan merancang respons cepat. Ketiga, perlu manajemen perubahan. Petani tidak otomatis beralih dari kebiasaan lama ke teknologi baru; perubahan memerlukan demonstrasi, kepercayaan, insentif, dan pendampingan. Keempat, perlu manajemen kelembagaan. PHT akan lebih berhasil jika dilakukan secara kawasan, bukan petak per petak.

Kebijakan publik harus mendukung inovasi yang inklusif. Subsidi atau bantuan alat sebaiknya tidak berhenti pada pengadaan fisik, tetapi mencakup pelatihan, perawatan, protokol penggunaan, evaluasi dampak, dan integrasi data. Program drone tanpa operator terlatih dan SOP agronomis akan mudah menjadi proyek simbolik. Program sensor tanpa dashboard keputusan juga akan kehilangan makna.

22. Agenda Strategis untuk Indonesia

Indonesia perlu membangun agenda strategis manajemen hama modern berbasis teknologi melalui beberapa langkah.

Pertama, memperkuat PHT sebagai fondasi. Teknologi apa pun harus tunduk pada prinsip PHT: pengamatan, ambang ekonomi, konservasi musuh alami, pengendalian selektif, dan penggunaan pestisida secara bijaksana.

Kedua, membangun basis data hama nasional. Data dari penyuluh, petani, perguruan tinggi, BRIN, BBPOPT, dinas pertanian, dan sektor swasta perlu diintegrasikan dengan standar yang jelas.

Ketiga, mengembangkan layanan teknologi bersama. Drone, sensor, dan analitik data sebaiknya tersedia melalui koperasi, BUMDes, kelompok tani, atau unit jasa agar petani kecil tidak tertinggal.

Keempat, memperbarui Sekolah Lapang PHT. Kurikulum perlu memasukkan literasi digital, interpretasi data, etika teknologi, perubahan iklim, dan pertanian presisi.

Kelima, memperkuat riset lokal. Model AI, biopestisida, RNAi, dan teknologi lain harus diuji dalam kondisi agroekosistem Indonesia.

Keenam, membangun regulasi adaptif. Regulasi harus melindungi manusia dan lingkungan tanpa mematikan inovasi.

Ketujuh, menciptakan insentif pasar. Produk yang dikelola dengan PHT, rendah residu, dan terdokumentasi perlu mendapatkan penghargaan pasar agar petani memiliki motivasi ekonomi.

23. Kesimpulan

Manajemen hama modern berbasis teknologi adalah respons terhadap tantangan besar pertanian abad ke-21. Perubahan iklim, resistensi hama, tuntutan keamanan pangan, keterbatasan tenaga kerja, dan kebutuhan efisiensi mendorong pertanian untuk bergerak menuju sistem yang lebih cerdas, presisi, dan berkelanjutan. Sensor, drone, AI, analitik data, biopestisida, RNAi, CRISPR, mikrobioma, dan sistem peringatan dini membuka peluang besar untuk memperbaiki pengelolaan hama.

Namun, teknologi bukan tujuan akhir. Tujuan akhir adalah agroekosistem yang sehat, petani yang sejahtera, pangan yang aman, dan lingkungan yang lestari. Oleh karena itu, semua teknologi harus ditempatkan dalam kerangka Pengelolaan Hama Terpadu. PHT modern bukan sekadar mengurangi pestisida, tetapi membangun sistem keputusan berbasis ekologi, data, dan partisipasi.

Bagi Indonesia, peluangnya sangat besar karena PHT telah memiliki sejarah, dasar kebijakan, dan kebutuhan praktis yang kuat. Namun, tantangannya juga nyata: biaya, akses petani kecil, literasi digital, data lokal, regulasi, privasi, dan risiko teknologi yang tidak sesuai konteks. Jika tantangan ini diatasi melalui kebijakan inklusif, riset lokal, kelembagaan kuat, dan pendidikan petani, Indonesia dapat membangun model manajemen hama modern yang tidak hanya canggih, tetapi juga adil dan berkelanjutan.

Dengan demikian, masa depan manajemen hama bukanlah perang tanpa akhir melawan alam, melainkan seni mengelola keseimbangan. Teknologi membantu manusia melihat lebih jauh, membaca lebih cepat, dan bertindak lebih tepat. Tetapi kebijaksanaan ekologis tetap menjadi kompas utama. Pertanian abad ke-21 membutuhkan bukan hanya alat yang pintar, tetapi juga manusia, kelembagaan, dan kebijakan yang bijaksana.

Glosarium

Agens hayati: Organisme hidup seperti jamur, bakteri, predator, parasitoid, atau virus yang digunakan untuk menekan hama atau penyakit tanaman.

Agroekosistem: Sistem ekologi pertanian yang mencakup tanaman, tanah, air, hama, musuh alami, mikroba, iklim, dan manusia.

AI atau kecerdasan buatan: Sistem komputasi yang mampu mengenali pola, membuat prediksi, dan membantu pengambilan keputusan.

Ambang ekonomi: Tingkat populasi hama atau kerusakan tanaman ketika tindakan pengendalian secara ekonomi dianggap layak.

Analitik data: Proses mengolah data menjadi informasi, prediksi, rekomendasi, atau keputusan.

Biopestisida: Produk pengendali hama berbasis organisme hidup, metabolit biologis, bahan alami, atau molekul biologis.

CRISPR-Cas: Teknologi pengeditan gen yang memungkinkan perubahan materi genetik secara presisi.

Drone sprayer: Drone yang dilengkapi tangki dan nozzle untuk menyemprotkan bahan pengendali atau pupuk cair.

Gene drive: Sistem genetik yang dirancang agar sifat tertentu menyebar cepat dalam populasi organisme.

Internet of Things: Jaringan perangkat fisik seperti sensor, kamera, dan perangkat pintar yang terhubung untuk mengirim data.

Mikrobioma tanaman: Komunitas mikroorganisme yang hidup di sekitar atau di dalam tanaman dan memengaruhi kesehatan tanaman.

Musuh alami: Organisme yang menekan populasi hama secara alami, seperti predator, parasitoid, atau patogen serangga.

PHT: Pengelolaan Hama Terpadu, yaitu pendekatan pengendalian hama berbasis ekologi, ekonomi, dan sosial dengan memadukan berbagai teknik pengendalian.

Pertanian presisi: Sistem pertanian yang menggunakan data dan teknologi untuk memberikan tindakan secara tepat lokasi, tepat waktu, tepat dosis, dan tepat kebutuhan.

Perangkat pintar: Perangkat hama yang dilengkapi sensor, kamera, atau koneksi internet untuk memantau populasi hama.

RNA interference: Mekanisme pembungkaman gen menggunakan molekul RNA untuk menekan fungsi gen tertentu.

Sensor mikroklimat: Sensor yang mengukur kondisi lingkungan mikro di lahan seperti suhu, kelembapan, dan kelembapan daun.

Sistem peringatan dini: Sistem yang memberikan informasi risiko sebelum serangan hama berkembang menjadi kerusakan berat.

Daftar Pustaka APA 7

Ahmad, B., et al. (2026). Modern tools for sustainable agriculture: A review of intelligent technologies in farming systems. *Discover Agriculture*.

Badan Riset dan Inovasi Nasional. (2023). *Peran teknologi AI dalam pengembangan drone dan sensor di bidang pertanian*. BRIN.

Badan Riset dan Inovasi Nasional. (2024). *Sinergi Pusat Riset Hortikultura dalam inisiasi pengembangan pertanian cerdas di tingkat petani*. BRIN.

Balai Besar Peramalan Organisme Pengganggu Tumbuhan. (2023). *Pengelolaan Hama Terpadu (PHT)*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Balai Besar Peramalan Organisme Pengganggu Tumbuhan. (2025). *Tonjolkan teknologi drone pertanian, Kementan fokus dorong swasembada pangan*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Direktorat Jenderal Perkebunan. (n.d.). *Pengendalian Hama Terpadu*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *Integrated Pest Management*. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *NSP—Integrated Pest Management*. FAO.

Innovative Genomics Institute. (2024). *CRISPR in agriculture: 2024 in review*. University of California, Berkeley.

Javed, K., et al. (2025). Artificial intelligence in crop protection: Revolutionizing pest identification, disease detection, and weed management. *Smart Agricultural Technology*.

Li, X., et al. (2026). Spray-applied RNA interference biopesticides. *Horticulturae*, 12(2), 137.

Rahman, M. T., et al. (2026). The role of AI-integrated drone systems in agricultural productivity and sustainable pest management. *AgriEngineering*.

Saini, A., et al. (2026). Genome editing tools, specifically CRISPR/Cas9 and future prospects for insect-pest control. *Journal of Invertebrate Pathology*.

Zhu, H., et al. (2024). Intelligent agriculture: Deep learning in UAV-based remote sensing imagery for crop diseases and pests detection. *Frontiers in Plant Science*.

Copilot for this article: ChatGPT 5.4. Thinking (2026). Access date: 27 April 2026. Author's account ([Rudy C Tarumingkeng](#))

<https://chatgpt.com/c/69eef51e-1cac-839f-a45c-e8effce332c9>