



*Rudy C Tarumingkeng: Masa Depan Manajemen Hama: Sensor, Drone,
dan Analitik Data dalam Pertanian Modern*

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

27 April 2026

MASA DEPAN MANAJEMEN HAMA: SENSOR, DRONE, DAN ANALITIK DATA DALAM PERTANIAN MODERN

Abstrak

Manajemen hama pertanian sedang memasuki fase transformasi besar. Jika pada masa lalu pengendalian hama banyak bergantung pada pengamatan manual dan penggunaan pestisida secara rutin, maka pertanian modern bergerak menuju sistem yang lebih presisi, berbasis data, dan ekologis. Sensor, drone, Internet of Things, citra multispektral, kecerdasan buatan, dan analitik data memungkinkan petani, penyuluh, peneliti, serta pengambil kebijakan mendeteksi gejala serangan hama lebih awal, memantau kondisi tanaman secara real-time, memprediksi risiko ledakan populasi hama, dan melakukan intervensi secara lebih tepat sasaran. Perubahan ini sejalan dengan prinsip Pengelolaan Hama Terpadu atau *Integrated Pest Management* yang menurut FAO merupakan pendekatan berbasis ekosistem untuk menumbuhkan tanaman sehat, meminimalkan gangguan terhadap agroekosistem, dan mendorong mekanisme pengendalian alami. ([FAOHome](#))

Makalah ini membahas masa depan manajemen hama melalui tiga pilar teknologi utama: sensor lapangan, drone, dan analitik data. Sensor berfungsi sebagai "indra digital" yang membaca kelembapan tanah, suhu, kelembapan udara, intensitas cahaya, kondisi daun, keberadaan serangga, serta variabel lingkungan lain yang memengaruhi dinamika hama. Drone menjadi "mata udara" yang dapat memetakan kondisi tanaman secara cepat, luas, dan detail melalui citra RGB, multispektral, termal, maupun hiperspektral. Analitik data menjadi "otak keputusan" yang mengolah data lapangan menjadi peringatan dini, peta risiko, rekomendasi pengendalian,

serta model prediktif. Kajian mutakhir menunjukkan bahwa teknologi UAV atau drone dengan pembelajaran mendalam dapat menjadi metode yang efisien, tepat waktu, dan akurat untuk monitoring hama serta penyakit tanaman. ([Frontiers](#))

Dalam konteks Indonesia, adopsi sensor dan drone harus dibaca bukan hanya sebagai modernisasi alat, tetapi sebagai transformasi sistem perlindungan tanaman. Kementerian Pertanian telah menempatkan drone sebagai bagian dari modernisasi pertanian, termasuk untuk pemetaan lahan, penyemprotan, dan pengendalian organisme pengganggu tanaman. (serealia.brmp.pertanian.go.id) Namun, manfaat teknologi ini tidak otomatis tercapai tanpa dukungan literasi digital petani, kelembagaan kelompok tani, validasi agronomis, tata kelola data, model bisnis layanan bersama, regulasi penerbangan dan pestisida, serta integrasi dengan prinsip PHT. Makalah ini menegaskan bahwa masa depan manajemen hama bukanlah sekadar mengganti manusia dengan mesin, melainkan membangun sistem keputusan pertanian yang lebih cerdas, partisipatif, presisi, dan berkelanjutan.

Kata kunci: manajemen hama, Pengelolaan Hama Terpadu, sensor, drone, analitik data, pertanian presisi, kecerdasan buatan, Internet of Things, smart farming, pest monitoring.

Masa Depan Manajemen Hama: Sensor, Drone, dan Analitik Data dalam Pertanian Modern

1. Pendahuluan

Pertanian selalu berada dalam hubungan dinamis dengan hama. Dalam setiap sistem budidaya, tanaman yang ditanam manusia menjadi bagian

dari jaringan ekologis yang melibatkan serangga, jamur, bakteri, virus, gulma, nematoda, predator, parasitoid, mikroba tanah, iklim, air, serta praktik manusia. Ketika hubungan ini seimbang, organisme pengganggu tanaman dapat tetap berada di bawah tingkat kerugian ekonomi. Namun ketika keseimbangan terganggu—misalnya karena monokultur, penggunaan pestisida berlebihan, perubahan iklim, degradasi tanah, atau lemahnya monitoring—hama dapat berkembang menjadi ancaman serius bagi produktivitas dan ketahanan pangan.

Manajemen hama pada abad ke-21 tidak lagi cukup dilakukan dengan pola lama: melihat gejala, memperkirakan secara kasar, lalu menyemprot pestisida. Pola ini memiliki beberapa kelemahan. Pertama, tindakan sering terlambat karena gejala visual baru tampak setelah kerusakan terjadi. Kedua, keputusan sering tidak berbasis data populasi hama, musuh alami, kondisi iklim, dan ambang ekonomi. Ketiga, penggunaan pestisida yang tidak tepat dapat meningkatkan biaya, mencemari lingkungan, menimbulkan resistensi hama, dan mengganggu musuh alami. Keempat, perubahan iklim membuat pola serangan hama semakin tidak mudah diprediksi.

Karena itu, masa depan manajemen hama membutuhkan pendekatan baru: pengendalian yang bukan hanya reaktif, tetapi prediktif; bukan hanya berbasis pengalaman individual, tetapi berbasis data kolektif; bukan hanya mengandalkan pestisida, tetapi mengintegrasikan teknologi digital dengan ekologi pertanian. Di sinilah sensor, drone, dan analitik data menjadi penting. Ketiganya memungkinkan pertanian bergerak dari *calendar-based spraying* menuju *decision-based pest management*.

Pengelolaan Hama Terpadu atau PHT merupakan landasan filosofis bagi perubahan tersebut. FAO menjelaskan PHT sebagai proses dinamis yang menggunakan pendekatan sistem ekologis, mempertimbangkan berbagai pilihan pengendalian hama, serta menggabungkan pertimbangan ekonomi, lingkungan, dan sosial. ([FAOHome](#)) Dengan demikian, teknologi modern tidak boleh dipahami sebagai pengganti PHT, melainkan sebagai penguat

PHT. Sensor memperbaiki kualitas pengamatan; drone memperluas cakupan pemantauan; analitik data mempercepat interpretasi; dan kecerdasan buatan membantu mengenali pola yang sulit ditangkap manusia.

2. Evolusi Manajemen Hama: Dari Manual ke Digital

Secara historis, manajemen hama bergerak melalui beberapa tahap. Tahap pertama adalah pengendalian tradisional, ketika petani mengandalkan pengalaman lokal, rotasi tanaman, varietas lokal, tanaman perangkap, sanitasi lahan, dan pemanfaatan musuh alami. Tahap kedua adalah era kimia, ketika pestisida sintetis menjadi instrumen utama untuk mengendalikan hama secara cepat. Tahap ketiga adalah era PHT, ketika para ahli menyadari bahwa pestisida tidak dapat menjadi satu-satunya solusi karena dapat menimbulkan resistensi, ledakan hama sekunder, residu, dan kerusakan ekologi.

Kini kita memasuki tahap keempat: era PHT digital. Pada era ini, prinsip-prinsip PHT tetap berlaku, tetapi dilengkapi dengan teknologi penginderaan, otomasi, konektivitas, dan analitik. Monitoring tidak lagi hanya dilakukan dengan berjalan menyusuri petakan lahan, tetapi juga melalui perangkat pintar, sensor kelembapan, kamera lapangan, citra drone, citra satelit, serta sistem informasi geografis. Keputusan tidak lagi hanya berdasarkan intuisi, tetapi diperkuat oleh data historis, model cuaca, peta sebaran hama, dan prediksi risiko.

Perubahan ini penting karena hama bersifat spasial dan temporal. Artinya, serangan hama tidak muncul secara merata di seluruh lahan dan tidak berlangsung konstan sepanjang musim. Ada titik awal serangan, ada pola penyebaran, ada pengaruh cuaca, dan ada fase tanaman yang lebih rentan. Dengan teknologi digital, petani dapat mengetahui area mana yang berisiko tinggi, kapan tindakan diperlukan, dan jenis tindakan apa yang paling tepat. Hal ini membuka peluang untuk mengurangi penyemprotan

menyeluruh dan menggantinya dengan intervensi lokal yang lebih hemat dan ramah lingkungan.

Namun, digitalisasi manajemen hama tidak boleh dipahami secara sempit sebagai pembelian alat. Sebuah drone tidak otomatis menghasilkan pertanian presisi jika tidak ada protokol pengambilan data, interpretasi citra, ambang keputusan, dan tindak lanjut agronomis. Sensor tidak otomatis berguna jika data tidak dibaca dan diterjemahkan menjadi keputusan. Analitik data tidak akan efektif jika datanya buruk, tidak lengkap, atau tidak sesuai dengan konteks lokal. Oleh karena itu, masa depan manajemen hama adalah masa depan integrasi: integrasi alat, data, ekologi, kelembagaan, dan kapasitas manusia.

3. Sensor sebagai Indra Digital Agroekosistem

Sensor adalah fondasi utama pertanian presisi. Dalam konteks manajemen hama, sensor berfungsi sebagai alat untuk membaca kondisi lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan tanaman dan dinamika hama. Sensor dapat mengukur suhu udara, kelembapan udara, kelembapan tanah, intensitas cahaya, curah hujan, kecepatan angin, pH tanah, kandungan hara, suhu kanopi, kelembapan daun, dan berbagai indikator fisiologis tanaman. Data-data tersebut penting karena hama dan penyakit tanaman sering berkembang dalam kondisi lingkungan tertentu.

Sebagai contoh, beberapa penyakit jamur berkembang lebih cepat pada kelembapan tinggi dan periode basah daun yang panjang. Sebagian serangga memiliki siklus hidup yang dipengaruhi suhu. Gulma tumbuh cepat ketika kondisi tanah dan cahaya mendukung. Dengan sensor, petani dapat memperoleh sinyal dini sebelum gejala kerusakan terlihat jelas. Inilah pergeseran penting: dari mendeteksi kerusakan menuju mendeteksi risiko.

Sensor juga dapat diintegrasikan dengan perangkat hama. Perangkat pintar berbasis IoT dapat menggunakan kamera, cahaya, feromon, atau perekat untuk menangkap dan merekam serangga. Data gambar kemudian

dikirim ke sistem untuk dihitung dan diidentifikasi. Penelitian tentang sistem pest detection berbasis IoT menunjukkan bahwa platform seperti ini dapat membantu monitoring lapangan dan mengatasi keterbatasan metode tradisional yang bergantung pada tenaga terlatih serta rentan terhadap kesalahan manusia. ([Nature](#))

Dalam praktiknya, sensor bukan hanya alat teknis, tetapi juga instrumen manajemen risiko. Data sensor memungkinkan petani membangun kalender risiko hama, bukan hanya kalender tanam. Jika data menunjukkan kelembapan tinggi, suhu sesuai, dan populasi serangga mulai meningkat, maka sistem dapat mengirim peringatan agar petani meningkatkan pengamatan, memasang perangkat tambahan, memperbaiki sanitasi, atau menyiapkan pengendalian selektif.

Bagi Indonesia, sensor sangat relevan untuk komoditas hortikultura bernilai tinggi seperti cabai, bawang merah, tomat, kentang, melon, serta tanaman perkebunan seperti kopi, kakao, dan kelapa sawit. Namun, tantangan utamanya adalah biaya, perawatan alat, konektivitas internet, ketersediaan listrik, dan kemampuan membaca data. Karena itu, model implementasi yang lebih realistis adalah sensor berbasis kelompok tani, koperasi, penyuluh, sekolah lapang digital, atau layanan agritech.

4. Drone sebagai Mata Udara Pertanian Modern

Drone atau UAV (*unmanned aerial vehicle*) telah menjadi salah satu simbol pertanian modern. Dalam manajemen hama, drone memiliki dua fungsi utama: pemantauan dan aplikasi. Fungsi pemantauan dilakukan dengan kamera RGB, multispektral, hiperspektral, atau termal untuk membaca kondisi tanaman dari udara. Fungsi aplikasi dilakukan melalui drone sprayer untuk menyemprotkan pestisida, pupuk cair, biopestisida, atau bahan pengendali lain secara lebih presisi.

Keunggulan drone terletak pada kecepatan, cakupan, resolusi, dan fleksibilitas. Dalam lahan luas, pengamatan manual membutuhkan banyak

waktu dan tenaga. Drone dapat memetakan kondisi lahan dalam waktu singkat dan menghasilkan citra yang memperlihatkan variasi pertumbuhan tanaman. Citra multispektral dapat membantu mendeteksi stres tanaman yang belum tampak oleh mata manusia. Kajian tentang UAV dan pembelajaran mendalam menyimpulkan bahwa penginderaan jauh berbasis UAV menyediakan metode yang efisien, hemat biaya, tepat waktu, dan akurat untuk monitoring hama dan penyakit tanaman. ([Frontiers](#))

Drone juga memungkinkan pemetaan spasial serangan hama. Dalam banyak kasus, serangan tidak terjadi merata. Ada titik-titik awal atau *hotspot* yang kemudian menyebar. Dengan peta drone, petani dapat melakukan pengendalian hanya pada area tertentu, bukan seluruh lahan. Ini dapat menghemat pestisida, mengurangi biaya, dan menekan dampak lingkungan.

Di Indonesia, Kementerian Pertanian telah mendorong penggunaan drone dalam modernisasi pertanian. Salah satu laporan Kementan menyebut pelatihan pengoperasian drone untuk mendukung pemetaan lahan skala luas secara presisi. (serealia.brmp.pertanian.go.id) Sumber Kementan lain juga menyatakan bahwa drone telah dimanfaatkan untuk pengendalian organisme pengganggu tanaman pada padi, jagung, dan kedelai, dengan rencana perluasan pada pemupukan serta penyebaran benih. (bbpopt.tanamanpangan.pertanian.go.id)

Namun, penggunaan drone untuk manajemen hama harus berhati-hati. Drone sprayer memang dapat mempercepat penyemprotan dan mengurangi paparan langsung petani terhadap pestisida, tetapi efektivitasnya bergantung pada ukuran droplet, tinggi terbang, kecepatan angin, jenis nozzle, jenis formulasi, karakter kanopi tanaman, dan kalibrasi dosis. Jika tidak dikalibrasi dengan benar, drone dapat menyebabkan aplikasi tidak merata, drift, atau pemborosan bahan. Maka, drone harus ditempatkan dalam sistem SOP yang ketat.

5. Analitik Data sebagai Otak Keputusan

Sensor dan drone menghasilkan data. Namun data saja tidak cukup. Nilai utama muncul ketika data diolah menjadi informasi, informasi diubah menjadi pengetahuan, dan pengetahuan diterjemahkan menjadi keputusan. Di sinilah analitik data menjadi inti masa depan manajemen hama.

Analitik data dalam manajemen hama dapat dibagi menjadi beberapa tingkatan. Tingkat pertama adalah analitik deskriptif, yaitu menjawab pertanyaan "apa yang terjadi?" Misalnya: populasi hama meningkat, suhu naik, kelembapan tinggi, atau ada area tanaman yang menunjukkan stres. Tingkat kedua adalah analitik diagnostik, yaitu menjawab "mengapa terjadi?" Misalnya: peningkatan hama berkaitan dengan kelembapan tinggi, varietas rentan, pemupukan nitrogen berlebihan, atau kurangnya musuh alami. Tingkat ketiga adalah analitik prediktif, yaitu menjawab "apa yang mungkin terjadi?" Misalnya: sistem memprediksi risiko ledakan hama dalam tujuh hari ke depan. Tingkat keempat adalah analitik preskriptif, yaitu menjawab "apa yang harus dilakukan?" Misalnya: sistem merekomendasikan pengamatan ulang, pelepasan musuh alami, pemasangan perangkat, penggunaan biopestisida, atau penyemprotan selektif.

Kecerdasan buatan memperluas kemampuan analitik tersebut. Model pembelajaran mesin dapat mengenali pola visual pada daun, menghitung populasi serangga dari gambar perangkat, mengklasifikasikan tingkat serangan, dan menghubungkan data cuaca dengan risiko hama. Kajian tentang AI dalam manajemen hama 4R menekankan bahwa AI dapat membantu identifikasi hama yang tepat, pemilihan metode yang tepat, penentuan waktu pengendalian yang tepat, serta tindakan yang tepat.

([MDPI](#))

Dalam praktik PHT, analitik data dapat memperbaiki konsep ambang ekonomi. Selama ini, ambang ekonomi sering digunakan secara umum, padahal kondisi tiap lokasi berbeda. Dengan data historis, harga

komoditas, biaya pengendalian, kondisi cuaca, umur tanaman, dan populasi musuh alami, ambang keputusan dapat dibuat lebih kontekstual. Ini berarti keputusan pengendalian menjadi lebih adaptif, bukan sekadar mengikuti angka baku.

Namun, analitik data juga memiliki risiko. Model yang dibangun dari data negara lain belum tentu sesuai dengan agroekosistem Indonesia. Citra tanaman di daerah tropis, variasi varietas, tipe tanah, intensitas cahaya, dan sistem budidaya lokal dapat berbeda. Karena itu, data lokal sangat penting. Indonesia perlu membangun basis data hama nasional yang mengintegrasikan data penyuluh, petani, perguruan tinggi, BRIN, Kementerian Pertanian, dan sektor swasta.

6. Integrasi Sensor, Drone, dan Data dalam PHT Digital

PHT digital tidak sekadar menambahkan teknologi pada sistem lama. Ia mengubah cara kerja manajemen hama secara menyeluruh. Dalam sistem ideal, sensor lapangan memantau kondisi mikroklimat, perangkat pintar menghitung populasi hama, drone memetakan kesehatan tanaman, petani melakukan validasi lapangan, dan sistem analitik memberikan rekomendasi berbasis ambang kendali. Semua data masuk ke platform bersama sehingga keputusan dapat dibuat lebih cepat dan akurat.

Contoh alurnya sebagai berikut. Pada minggu pertama, sensor menunjukkan peningkatan kelembapan dan suhu yang sesuai untuk perkembangan penyakit tertentu. Pada saat yang sama, drone menemukan area tanaman yang indeks vegetasinya menurun. Perangkat pintar mendeteksi peningkatan serangga vektor. Sistem analitik menandai area tersebut sebagai zona risiko. Penyuluh dan petani kemudian melakukan pemeriksaan lapangan. Jika diagnosis terkonfirmasi, tindakan dilakukan hanya pada area tertentu, dengan metode yang paling sesuai. Setelah tindakan, drone dan sensor kembali digunakan untuk mengevaluasi hasil.

Model seperti ini dapat mengubah logika pengendalian hama. Pertama, pengendalian menjadi lebih dini. Kedua, tindakan menjadi lebih presisi. Ketiga, pestisida dapat dikurangi karena aplikasi tidak dilakukan secara seragam tanpa dasar. Keempat, musuh alami dapat lebih terlindungi karena intervensi dilakukan selektif. Kelima, data musim ke musim dapat menjadi dasar pembelajaran kolektif.

Namun, integrasi ini memerlukan standar data. Jika setiap alat menghasilkan format berbeda dan tidak saling terhubung, data sulit digunakan. Karena itu, masa depan PHT digital membutuhkan interoperabilitas: sensor, drone, aplikasi petani, sistem penyuluhan, dan database pemerintah harus dapat berkomunikasi. Di sinilah tata kelola data pertanian menjadi isu strategis.

7. Studi Kasus Naratif: Cabai, Sensor Mikroklimat, dan Drone

Bayangkan sebuah sentra cabai di dataran tinggi. Petani sering menghadapi serangan trips, kutu kebul, antraknosa, dan virus yang ditularkan serangga. Pada pola lama, petani menyemprot secara rutin karena takut gagal panen. Biaya pestisida tinggi, risiko residu meningkat, dan musuh alami terganggu.

Dalam sistem PHT digital, kelompok tani memasang sensor suhu, kelembapan, dan kelembapan daun. Beberapa perangkat kuning dilengkapi kamera sederhana untuk memantau populasi serangga. Drone diterbangkan seminggu sekali untuk memetakan area tanaman yang menunjukkan stres. Data masuk ke aplikasi kelompok tani. Ketika populasi trips mulai meningkat pada beberapa titik, sistem memberi peringatan. Petani tidak langsung menyemprot seluruh lahan, tetapi melakukan pemeriksaan lapangan. Jika ditemukan serangan awal, tindakan dilakukan secara lokal: pemasangan perangkat tambahan, sanitasi tanaman, pengaturan kelembapan, penggunaan agens hayati, atau pestisida selektif jika ambang kendali terlampaui.

Hasilnya bukan hanya pengurangan biaya, tetapi perubahan budaya keputusan. Petani mulai bertanya: "Apa bukti bahwa kita perlu menyemprot?" bukan "Kapan jadwal semprot berikutnya?" Inilah inti pertanian presisi: keputusan berdasarkan kondisi nyata, bukan kebiasaan.

8. Studi Kasus Naratif: Padi, Drone, dan Pengendalian OPT

Pada lahan padi, organisme pengganggu tanaman seperti wereng, penggerek batang, penyakit hawar, dan gulma dapat muncul dalam pola spasial yang berbeda. Pengamatan manual tetap penting, tetapi pada hamparan luas sering sulit dilakukan secara merata. Drone dapat membantu memetakan variasi pertumbuhan tanaman, area kekuningan, genangan, atau stres yang memerlukan inspeksi.

Kementerian Pertanian telah menyebut pemanfaatan drone untuk pengendalian OPT padi, jagung, dan kedelai, serta perluasan pemanfaatannya dalam program modernisasi pertanian.

(bbpopt.tanamanpangan.pertanian.go.id) Dalam konteks PHT, drone bukan hanya alat semprot, tetapi juga alat pengambilan keputusan. Jika drone hanya digunakan untuk mempercepat penyemprotan pestisida rutin, maka teknologi modern justru dapat mempercepat praktik lama yang kurang ekologis. Sebaliknya, jika drone digunakan untuk monitoring, pemetaan risiko, dan aplikasi selektif, maka ia menjadi instrumen PHT digital.

Pada sistem ideal, data drone dikombinasikan dengan pengamatan petani. Area yang tampak stres dari udara diperiksa: apakah karena hama, penyakit, kekurangan hara, kekeringan, atau genangan? Ini penting karena gejala visual dari udara tidak selalu spesifik. Warna daun menguning dapat disebabkan hama, nitrogen rendah, penyakit, atau masalah air. Maka, drone memberi sinyal, tetapi diagnosis tetap membutuhkan validasi lapangan.

9. Dampak terhadap Penggunaan Pestisida

Salah satu manfaat utama sensor, drone, dan analitik data adalah peluang mengurangi penggunaan pestisida yang tidak perlu. Dalam sistem konvensional, penyemprotan sering dilakukan berdasarkan kalender, bukan berdasarkan populasi hama. Dalam sistem presisi, penyemprotan dilakukan ketika data menunjukkan kebutuhan.

Pengurangan pestisida tidak berarti menolak pestisida. Dalam PHT, pestisida tetap dapat digunakan, tetapi sebagai bagian dari strategi terpadu. Teknologi digital membantu menentukan kapan, di mana, dan bagaimana pestisida digunakan. Drone sprayer dapat mengurangi kontak langsung petani dengan bahan kimia, sedangkan peta risiko dapat membatasi area aplikasi. Kementerian Pertanian menyebut drone sprayer sebagai teknologi yang dapat membantu aplikasi pestisida, pupuk cair, dan penyiraman secara lebih tepat sehingga menghindari penggunaan input berlebihan. (pustaka.bppsdp.pertanian.go.id)

Namun, harus diingat bahwa teknologi aplikasi presisi tidak selalu identik dengan pengurangan pestisida. Jika drone membuat penyemprotan menjadi sangat mudah dan murah tanpa kontrol PHT, ada risiko penyemprotan justru semakin sering. Oleh karena itu, teknologi harus dikaitkan dengan ambang kendali, regulasi pestisida, pelatihan operator, dan sistem pencatatan aplikasi.

10. Tantangan Implementasi di Indonesia

Masa depan manajemen hama digital di Indonesia memiliki peluang besar, tetapi juga tantangan struktural. Pertama, skala usaha tani Indonesia umumnya kecil dan tersebar. Banyak petani tidak memiliki modal untuk membeli drone, sensor, atau aplikasi berbayar. Solusinya adalah model layanan bersama: koperasi drone, unit jasa alsintan, BUMDes, startup agritech, atau kelompok tani digital.

Kedua, literasi digital petani masih beragam. Teknologi yang terlalu rumit akan sulit diadopsi. Aplikasi harus sederhana, menggunakan bahasa lokal, dan memberikan rekomendasi praktis. Ketiga, konektivitas internet di beberapa wilayah masih terbatas. Sistem harus mampu bekerja secara offline atau semi-online. Keempat, data lokal belum cukup kuat. Model AI membutuhkan data gambar dan data lapangan dari berbagai wilayah, musim, varietas, dan komoditas Indonesia.

Kelima, diperlukan tenaga perantara baru: operator drone pertanian, analis data pertanian, teknisi sensor, penyuluh digital, dan agronom data. Ini membuka peluang pekerjaan baru bagi generasi muda desa. BRIN mencatat bahwa penggunaan teknologi seperti AI, drone, dan sensor dalam pertanian dapat membantu monitoring lahan, identifikasi kesuburan, dan tindakan tepat waktu. ([BRIN - Badan Riset dan Inovasi Nasional](#))

Keenam, tata kelola data harus jelas. Data lahan petani adalah aset. Siapa pemilik data? Siapa yang boleh mengakses? Apakah data dapat digunakan oleh perusahaan input, pembeli komoditas, bank, atau asuransi? Petani harus dilindungi dari eksploitasi data. Prinsipnya, digitalisasi pertanian harus memperkuat posisi petani, bukan menjadikan petani sekadar objek ekstraksi data.

11. Risiko Etis dan Ekologis

Teknologi modern membawa manfaat, tetapi juga risiko. Dalam konteks drone, ada risiko privasi lahan, keselamatan penerbangan, drift pestisida, dan penggunaan oleh operator yang belum terlatih. Dalam konteks sensor, ada risiko ketergantungan pada perangkat yang dapat rusak atau menghasilkan data keliru. Dalam konteks AI, ada risiko salah diagnosis, bias data, dan rekomendasi yang tidak sesuai kondisi lokal.

Risiko ekologis juga perlu diperhatikan. Jika drone sprayer digunakan untuk memperluas aplikasi pestisida tanpa prinsip PHT, maka teknologi justru dapat memperkuat ketergantungan kimia. Jika analitik data hanya

dirancang untuk meningkatkan penjualan input, bukan kesehatan agroekosistem, maka tujuan keberlanjutan akan bergeser. Karena itu, sistem digital harus memiliki indikator ekologis: keberadaan musuh alami, kesehatan tanah, residu pestisida, keanekaragaman hayati, dan risiko resistensi.

Etika teknologi dalam manajemen hama harus mencakup lima prinsip. Pertama, kehati-hatian: teknologi baru harus diuji sebelum diterapkan luas. Kedua, transparansi: petani harus tahu bagaimana rekomendasi dibuat. Ketiga, akuntabilitas: harus jelas siapa bertanggung jawab jika rekomendasi sistem salah. Keempat, keadilan akses: petani kecil tidak boleh tertinggal. Kelima, keberlanjutan: teknologi harus mendukung agroekosistem, bukan hanya efisiensi jangka pendek.

12. Desain Sistem PHT Digital untuk Indonesia

Untuk Indonesia, PHT digital dapat dirancang dalam beberapa lapis.

Lapis pertama adalah monitoring dasar. Petani dan penyuluh tetap melakukan pengamatan lapangan, tetapi dibantu aplikasi sederhana untuk mencatat populasi hama, musuh alami, cuaca, dan gejala. Lapis kedua adalah sensor komunitas. Kelompok tani memasang sensor mikroklimat dan perangkat pintar di titik representatif. Lapis ketiga adalah pemetaan drone berkala, terutama pada komoditas bernilai tinggi atau hamparan luas. Lapis keempat adalah dashboard analitik di tingkat kecamatan atau kabupaten. Lapis kelima adalah sistem peringatan dini regional yang menghubungkan data lapangan dengan informasi cuaca dan sejarah serangan.

Sistem ini tidak harus dimulai dengan teknologi mahal. Tahap awal dapat menggunakan ponsel, formulir digital, perangkat sederhana, dan pelatihan identifikasi hama. Setelah kapasitas meningkat, sensor dan drone ditambahkan. Prinsipnya adalah bertahap, adaptif, dan berbasis kebutuhan.

Perguruan tinggi dapat berperan sebagai pengembang model, penyedia validasi ilmiah, dan pusat pelatihan. Pemerintah daerah dapat memfasilitasi alat bersama dan integrasi data. Penyuluh menjadi jembatan antara data dan keputusan. Petani menjadi subjek utama yang mengamati, menguji, dan mengevaluasi. Sektor swasta dapat menyediakan teknologi, tetapi harus tunduk pada standar transparansi, perlindungan data, dan keberlanjutan.

13. Implikasi bagi Pendidikan dan Penyuluhan Pertanian

Masa depan manajemen hama digital menuntut perubahan pendidikan pertanian. Mahasiswa pertanian, penyuluh, dan petani muda tidak cukup hanya belajar taksonomi hama dan cara penyemprotan. Mereka perlu memahami ekologi hama, statistik dasar, interpretasi citra, pengoperasian drone, sensor IoT, basis data, kecerdasan buatan, dan etika teknologi.

Sekolah Lapang PHT juga perlu diperbarui. Jika dulu petani membawa jaring serangga, kaca pembesar, dan papan pengamatan, kini mereka dapat membawa ponsel, aplikasi pencatatan, kamera, dan akses dashboard. Namun, prinsip dasarnya tetap sama: belajar dari lahan. Teknologi digital harus memperkuat pengamatan, bukan menggantikannya. Petani tetap harus mampu membedakan hama dan musuh alami, memahami ambang kendali, dan menilai kondisi tanaman.

Dalam konteks generasi muda, sensor dan drone dapat membuat pertanian lebih menarik. Banyak anak muda enggan masuk pertanian karena dianggap tradisional dan kurang menjanjikan. Kehadiran teknologi membuka citra baru: petani masa depan adalah manajer data, operator teknologi, pengamat ekologi, dan wirausahawan pangan. Inilah peluang penting bagi regenerasi pertanian Indonesia.

14. Manfaat Ekonomi dan Manajerial

Dari perspektif manajemen, teknologi sensor, drone, dan analitik data memberikan manfaat pada empat dimensi.

Pertama, efisiensi biaya. Dengan deteksi dini dan aplikasi selektif, biaya pestisida, tenaga kerja, dan kehilangan hasil dapat ditekan. Kedua, produktivitas. Tanaman yang dipantau lebih baik memiliki peluang lebih besar untuk tumbuh optimal. Ketiga, kualitas produk. Pengurangan residu dan pengendalian yang lebih tepat dapat meningkatkan peluang pasar, terutama untuk produk hortikultura, ekspor, dan pangan sehat. Keempat, manajemen risiko. Data historis memungkinkan petani dan pemerintah merancang strategi antisipasi terhadap ledakan hama.

Namun, manfaat ekonomi harus dihitung secara realistis. Investasi sensor dan drone membutuhkan biaya awal, pemeliharaan, pelatihan, dan pembaruan perangkat lunak. Karena itu, analisis kelayakan harus mempertimbangkan skala lahan, nilai komoditas, tingkat risiko hama, model kepemilikan alat, dan kemampuan kelompok tani. Untuk petani kecil, model sewa layanan sering lebih masuk akal daripada kepemilikan individu.

15. Menuju Sistem Peringatan Dini Hama Nasional

Salah satu visi penting masa depan adalah sistem peringatan dini hama nasional. Sistem ini akan menggabungkan data cuaca, citra satelit, citra drone, laporan penyuluh, laporan petani, perangkat pintar, data historis serangan, dan model prediktif. Tujuannya adalah memberikan informasi risiko secara cepat kepada petani dan pengambil kebijakan.

Sistem seperti ini sangat penting karena hama tidak mengenal batas administrasi. Serangan di satu wilayah dapat menyebar ke wilayah lain. Dengan data spasial, pemerintah dapat mengidentifikasi zona risiko, menyiapkan agens hayati, memperingatkan petani, dan mengarahkan intervensi. Dalam konteks perubahan iklim, sistem peringatan dini menjadi

semakin penting karena pola serangan hama dapat berubah mengikuti suhu, curah hujan, dan musim yang tidak stabil.

Namun, sistem nasional harus dibangun dari bawah. Data petani harus dihargai. Penyuluh harus diperkuat. Perguruan tinggi daerah harus dilibatkan. Platform tidak boleh hanya menjadi proyek teknologi, tetapi harus menjadi ekosistem pembelajaran dan tindakan.

16. Kesimpulan

Masa depan manajemen hama berada pada titik pertemuan antara ekologi dan teknologi. Sensor, drone, dan analitik data membuka peluang besar untuk mengubah pengendalian hama dari praktik reaktif menjadi sistem prediktif, presisi, dan berkelanjutan. Sensor berfungsi sebagai indra digital yang membaca kondisi lingkungan dan populasi hama. Drone menjadi mata udara yang memetakan kondisi tanaman secara cepat dan luas. Analitik data menjadi otak keputusan yang mengubah data menjadi rekomendasi.

Namun, teknologi bukan tujuan akhir. Tujuan akhir adalah pertanian yang produktif, sehat, efisien, adil, dan ekologis. Oleh karena itu, sensor, drone, dan analitik data harus ditempatkan dalam kerangka Pengelolaan Hama Terpadu. Jika teknologi hanya digunakan untuk mempercepat penyemprotan pestisida tanpa pengamatan dan ambang kendali, maka ia hanya memperkuat pola lama. Tetapi jika teknologi digunakan untuk monitoring, deteksi dini, aplikasi selektif, perlindungan musuh alami, dan pembelajaran petani, maka ia menjadi fondasi PHT generasi baru.

Bagi Indonesia, peluangnya sangat besar. Negara ini memiliki sejarah kuat dalam PHT, keanekaragaman agroekosistem, kebutuhan besar untuk ketahanan pangan, dan mulai meningkatnya dukungan terhadap pertanian presisi. Tantangannya adalah memastikan bahwa teknologi dapat diakses petani kecil, sesuai kondisi lokal, didukung penyuluhan, terintegrasi dengan data nasional, dan dikawal oleh etika serta regulasi.

Dengan demikian, masa depan manajemen hama bukanlah masa depan yang sepenuhnya mekanis, melainkan masa depan yang cerdas secara ekologis dan digital. Petani tidak digantikan oleh mesin; petani diperkuat oleh data. Lahan tidak lagi hanya dilihat dengan mata manusia; lahan juga dibaca melalui sensor, citra, dan model prediktif. Pengendalian hama tidak lagi sekadar tindakan membunuh organisme pengganggu, tetapi seni mengelola keseimbangan agroekosistem dengan bantuan teknologi modern.

Glosarium

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

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

Citra multispektral: Gambar yang menangkap beberapa panjang gelombang cahaya, termasuk yang tidak terlihat oleh mata manusia, untuk membaca kondisi tanaman.

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

Internet of Things: Jaringan perangkat fisik yang terhubung dan dapat mengirim data, seperti sensor tanah, perangkat pintar, dan stasiun cuaca.

Kecerdasan buatan: Sistem komputasi yang dapat mengenali pola, melakukan klasifikasi, membuat prediksi, atau membantu pengambilan keputusan.

Musuh alami: Organisme yang memangsa, memarasit, atau menekan populasi hama secara alami, seperti predator, parasitoid, dan 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 input secara tepat lokasi, tepat waktu, tepat dosis, dan tepat kebutuhan.

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

Remote sensing: Penginderaan jauh, yaitu pengumpulan informasi tentang objek atau area tanpa kontak langsung, misalnya melalui drone atau satelit.

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

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

UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*, yaitu pesawat tanpa awak atau drone.

Daftar Pustaka APA 7

Ahmed, S., et al. (2024). IoT based intelligent pest management system for integrated pest management. *Scientific Reports*.

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

BRIN. (2024). *BRIN kembangkan penelitian berbasis IoT untuk mendukung e-agrikultur*. Badan Riset dan Inovasi Nasional.

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

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

Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2025). *Drone sprayer, efektif ringankan pekerjaan petani*. Pusat Perpustakaan dan Literasi Pertanian.

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

Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2026). *Modernisasi pertanian di Kapuas: Kementan libatkan petani operasikan drone untuk percepatan tanam*. Balai Besar Perakitan dan Modernisasi Pertanian Serealia.

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

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*.

Yang, Y., et al. (2026). Recent advances in crop pest detection, forecasting and intelligent management. *Smart Agricultural Technology*.

Manono, B. O., et al. (2026). Precision farming with smart sensors: Current state and future directions. *Sensors*.

Copilot for this article: ChatGPT 5.4. Thinking (2026). Access date: 16 April 2026. Author's account ([Rudy C Tarumingkeng](#))

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

*Rudy C Tarumingkeng: Masa Depan Manajemen Hama: Sensor, Drone,
dan Analitik Data dalam Pertanian Modern*