



*Rudy C Tarumingkeng: Dari Laboratorium ke Lahan - Penemuan
Modern dalam Pengelolaan Hama Terpadu*

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

rudymt75@gmail.com

27 April 2026

DARI LABORATORIUM KE LAHAN: PENEMUAN MODERN DALAM PENGELOLAAN HAMA TERPADU

Abstrak

Pengelolaan Hama Terpadu atau *Integrated Pest Management* (IPM/PHT) merupakan pendekatan strategis dalam perlindungan tanaman yang mengintegrasikan prinsip ekologi, teknologi, ekonomi, dan sosial untuk menekan populasi organisme pengganggu tanaman tanpa merusak keseimbangan agroekosistem. Dalam konteks pertanian modern, PHT tidak lagi dapat dipahami semata-mata sebagai pengurangan penggunaan pestisida kimia, tetapi sebagai sistem pengambilan keputusan yang dinamis, berbasis data, dan responsif terhadap perubahan iklim, perdagangan global, resistensi hama, serta tuntutan keamanan pangan. FAO menempatkan PHT sebagai proses ekologis yang menggabungkan teknik biologis, kimia, fisik, dan budidaya untuk menumbuhkan tanaman sehat, meminimalkan penggunaan pestisida, serta mengurangi risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. ([FAOHome](#))

Makalah ini membahas perkembangan modern dalam PHT dari perspektif "dari laboratorium ke lahan", yaitu bagaimana temuan ilmiah dalam biologi molekuler, mikrobiologi, kecerdasan buatan, sensor digital, biopestisida, RNA interference, CRISPR, feromon, mikrobioma tanaman, dan pertanian presisi diterjemahkan menjadi praktik nyata di tingkat petani. Di Indonesia, PHT memiliki sejarah penting melalui Sekolah Lapang Pengendalian Hama Terpadu, yang dikembangkan pertama kali untuk padi dan kemudian

diadaptasi ke berbagai negara serta komoditas pertanian lain. FAO mencatat bahwa pendekatan *farmer field school* pertama kali dikembangkan di Indonesia untuk PHT padi dan kemudian diterapkan di lebih dari 130 negara. ([FAOHome](#))

Makalah ini menegaskan bahwa keberhasilan PHT modern tidak hanya bergantung pada kecanggihan laboratorium, tetapi juga pada kapasitas kelembagaan, literasi ekologis petani, regulasi yang adaptif, ketersediaan data, model bisnis yang inklusif, serta kepercayaan sosial terhadap teknologi baru. Dengan demikian, masa depan PHT bukanlah penggantian total pestisida oleh teknologi tunggal, melainkan rekonstruksi sistem perlindungan tanaman yang lebih cerdas, presisi, ekologis, dan partisipatif.

Kata kunci: *Pengelolaan Hama Terpadu, PHT, biopestisida, RNA interference, CRISPR, kecerdasan buatan, mikrobioma tanaman, pertanian presisi, Sekolah Lapang, agroekologi.*

Dari Laboratorium ke Lahan: Penemuan Modern dalam Pengelolaan Hama Terpadu

1. Pendahuluan

Hama, penyakit tanaman, dan gulma merupakan persoalan klasik dalam sejarah pertanian manusia. Sejak manusia mulai membudidayakan tanaman secara menetap, muncul pula tekanan biologis dari organisme lain yang memanfaatkan tanaman sebagai sumber makanan, tempat hidup, atau inang. Dalam sistem pertanian tradisional, tekanan hama sering kali dikendalikan oleh keragaman hayati, rotasi tanaman, musuh alami, varietas lokal, dan praktik budidaya yang relatif seimbang dengan lingkungan. Namun, ketika pertanian modern bergerak menuju monokultur skala luas,

intensifikasi input, penggunaan pupuk sintetis, dan pestisida kimia secara masif, hubungan ekologis antara tanaman, hama, musuh alami, tanah, air, dan iklim menjadi semakin rapuh.

Masalah hama bukan persoalan kecil. FAO menyatakan bahwa setiap tahun hingga 40 persen tanaman pangan dapat hilang akibat hama dan penyakit tanaman; dampaknya bukan hanya terhadap hasil panen, tetapi juga ketahanan pangan, perdagangan, mata pencaharian petani, dan ekonomi pertanian global. ([FAOHome](#)) Angka ini menunjukkan bahwa perlindungan tanaman adalah bagian integral dari sistem pangan dunia. Tanpa perlindungan tanaman yang efektif, produktivitas pertanian, stabilitas harga pangan, dan kesejahteraan petani akan terganggu.

Namun, pengalaman panjang pertanian abad ke-20 menunjukkan bahwa mengandalkan pestisida kimia sebagai senjata utama sering melahirkan masalah baru. Hama dapat mengembangkan resistensi, musuh alami dapat ikut terbunuh, residu pestisida dapat mencemari pangan dan lingkungan, serta kesehatan petani dapat terancam. Dalam banyak kasus, penggunaan pestisida yang tidak terkendali justru menciptakan ledakan hama sekunder karena predator dan parasitoid alami yang semula menjaga keseimbangan populasi hama telah berkurang. Dari titik inilah muncul pentingnya Pengelolaan Hama Terpadu.

PHT lahir dari kesadaran bahwa hama tidak dapat dipahami secara terpisah dari ekosistem pertanian. Hama bukan hanya "musuh" yang harus dimusnahkan, melainkan bagian dari jaringan biologis yang harus dikelola agar populasinya tetap berada di bawah ambang kerugian ekonomi. Prinsip ini membedakan PHT dari pendekatan konvensional yang cenderung reaktif dan berbasis penyemprotan rutin. PHT mengedepankan pengamatan, diagnosis, ambang kendali, pemanfaatan musuh alami, pengelolaan habitat, varietas tahan, praktik budidaya sehat, dan penggunaan pestisida secara selektif sebagai pilihan terakhir.

Dalam definisi FAO, PHT merupakan pertimbangan cermat terhadap seluruh teknik pengendalian hama yang tersedia, kemudian

mengintegrasikan tindakan yang sesuai untuk menghambat perkembangan populasi hama. PHT mengombinasikan strategi biologis, kimia, fisik, dan budidaya untuk menghasilkan tanaman sehat sekaligus meminimalkan risiko pestisida terhadap manusia dan lingkungan.

([FAOHome](#)) Dengan kata lain, PHT adalah sistem manajemen, bukan sekadar teknik. Ia membutuhkan pengetahuan, observasi, keputusan, dan pembelajaran.

Judul “Dari Laboratorium ke Lahan” menggambarkan perubahan besar dalam dunia perlindungan tanaman. Laboratorium menghasilkan penemuan tentang mikroba antagonis, mekanisme genetik hama, sinyal kimia feromon, teknik RNA interference, pengeditan gen CRISPR, model prediksi berbasis AI, serta sensor digital. Akan tetapi, nilai sebenarnya dari penemuan tersebut baru tampak ketika ia dapat bekerja di lahan petani: di sawah, kebun kopi, perkebunan kakao, hortikultura, rumah kaca, atau lahan pangan di desa-desa. Di sinilah tantangan utama muncul: bagaimana ilmu yang presisi di laboratorium dapat diterjemahkan ke dalam tindakan yang murah, mudah, aman, diterima petani, dan sesuai konteks lokal.

2. Konsep Dasar Pengelolaan Hama Terpadu

PHT bertumpu pada empat prinsip besar. Pertama, tanaman harus dikelola agar sehat sejak awal. Tanaman yang tumbuh dalam tanah sehat, dengan air cukup, varietas sesuai, nutrisi seimbang, dan sistem budidaya yang baik akan lebih tahan terhadap serangan hama. Kedua, agroekosistem harus diamati secara berkala. Keputusan pengendalian tidak boleh hanya berdasarkan rasa khawatir, kebiasaan, atau promosi produk, tetapi berdasarkan data lapangan: populasi hama, tingkat kerusakan, keberadaan musuh alami, umur tanaman, kondisi cuaca, dan nilai ekonomi komoditas.

Ketiga, musuh alami perlu dilindungi. Predator, parasitoid, patogen serangga, burung, laba-laba, kumbang, semut tertentu, dan mikroorganisme tanah merupakan bagian penting dari sistem pertahanan

alami. Ketika petani menyemprot pestisida spektrum luas tanpa perhitungan, ia mungkin membunuh hama, tetapi pada saat yang sama juga membunuh penjaga alami lahan. Keempat, pestisida kimia digunakan secara bijaksana, selektif, dan berbasis ambang kendali. Di Indonesia, Kementerian Pertanian menekankan bahwa PHT memadukan berbagai taktik pengendalian dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, ekologi, dan sosial; pengendalian kimiawi ditempatkan sebagai alternatif terakhir ketika kerusakan akibat organisme pengganggu tanaman telah mencapai ambang ekonomi. (ditjenbun.pertanian.go.id)

Prinsip ambang ekonomi sangat penting. Dalam PHT, keberadaan beberapa ekor hama tidak otomatis berarti tindakan penyemprotan harus dilakukan. Jika populasi hama masih rendah dan musuh alami cukup banyak, ekosistem mungkin mampu menekan hama secara alami. Tindakan pengendalian baru dipertimbangkan ketika populasi hama diperkirakan menyebabkan kerugian ekonomi lebih besar daripada biaya pengendalian. Dengan demikian, PHT mengubah logika petani dari “melihat hama langsung menyemprot” menjadi “mengamati, menghitung, menilai, lalu memutuskan”.

PHT juga mengandung dimensi sosial. Teknologi yang baik tidak selalu berhasil jika petani tidak memahami cara kerjanya, tidak mampu membiayainya, atau tidak percaya terhadap manfaatnya. Oleh sebab itu, PHT tidak hanya memerlukan paket teknologi, tetapi juga pendidikan petani, penyuluhan, kelompok tani, laboratorium lapangan, dukungan pasar, dan regulasi. Dalam sejarah Indonesia, Sekolah Lapang PHT menjadi contoh bagaimana pembelajaran orang dewasa dapat mengubah cara petani memahami lahan. FAO menjelaskan bahwa proses belajar dalam *farmer field school* memperkuat pemahaman petani tentang relasi ekologis kompleks di lapangan, membangun kerja kelompok, dan mendorong keputusan berbasis observasi. (FAOHome)

Dengan demikian, PHT dapat dipahami sebagai “manajemen pengetahuan ekologis”. Ia menggabungkan sains formal dan pengalaman petani.

Laboratorium memberikan alat, teori, dan inovasi; lahan memberikan realitas, variasi, dan ujian. PHT yang berhasil adalah PHT yang mampu menjembatani keduanya.

3. Dari Revolusi Kimia ke Revolusi Ekologi

Pada pertengahan abad ke-20, pestisida sintetis dipandang sebagai simbol kemajuan. Pestisida dianggap mampu mengatasi ancaman hama secara cepat, efisien, dan terukur. Dalam banyak situasi, pestisida memang berperan menyelamatkan tanaman dari serangan berat. Namun, pemakaian pestisida secara berlebihan mengubah lanskap ekologis pertanian. Resistensi hama meningkat, residu menjadi perhatian, dan organisme bukan sasaran terdampak. Kesadaran inilah yang mendorong pergeseran dari revolusi kimia menuju revolusi ekologi.

Revolusi ekologi dalam pengelolaan hama tidak berarti menolak semua bahan kimia. Yang ditolak adalah ketergantungan tunggal dan tidak rasional terhadap pestisida. Dalam kerangka PHT, pestisida masih dapat digunakan, tetapi dengan prinsip tepat sasaran, tepat waktu, tepat dosis, tepat cara, dan tepat alasan. Pestisida bukan lagi ritual rutin, melainkan instrumen terakhir dalam sistem keputusan.

Di Indonesia, PHT mempunyai sejarah kuat karena berkaitan dengan pengalaman pengendalian wereng batang cokelat pada padi. Ledakan hama pada masa lalu memperlihatkan bahwa penyemprotan yang tidak selektif dapat memperparah masalah karena membunuh musuh alami. Pendekatan Sekolah Lapang kemudian memperkenalkan petani pada pengamatan agroekosistem, identifikasi serangga, analisis populasi, dan keputusan berbasis ambang kendali. FAO mencatat bahwa pendekatan Sekolah Lapang pertama kali dikembangkan di Indonesia untuk PHT padi sebelum meluas ke berbagai tema seperti kesehatan tanah, air, benih, agroforestri, nutrisi, dan pasar. ([FAOHome](#))

Perubahan dari kimia ke ekologi juga mengubah cara memandang petani. Dalam model lama, petani sering diposisikan sebagai pengguna produk. Dalam PHT, petani harus menjadi pengamat, peneliti kecil, dan pengambil keputusan. Lahan menjadi laboratorium terbuka. Setiap minggu, petani mengamati tanaman, menghitung hama, mengenali musuh alami, menilai cuaca, dan mendiskusikan pilihan tindakan. Pendekatan ini memberi ruang bagi kemandirian petani, bukan sekadar ketergantungan pada rekomendasi luar.

4. Penemuan Modern Pertama: Biopestisida Mikroba

Salah satu penemuan modern yang paling penting dalam PHT adalah pengembangan biopestisida mikroba. Biopestisida mikroba memanfaatkan bakteri, jamur, virus, nematoda entomopatogen, atau mikroorganisme lain untuk menekan hama dan penyakit tanaman. Contoh yang luas dikenal adalah *Bacillus thuringiensis* untuk serangga tertentu, *Beauveria bassiana* dan *Metarhizium anisopliae* untuk berbagai hama serangga, serta *Trichoderma* untuk menekan penyakit tular tanah.

Daya tarik biopestisida mikroba terletak pada selektivitas dan kompatibilitasnya dengan PHT. Banyak agen hayati bekerja lebih spesifik dibanding pestisida spektrum luas sehingga risiko terhadap musuh alami dan organisme bukan sasaran relatif lebih kecil. Tinjauan tentang produksi mikroba untuk biopestisida menempatkan bakteri seperti *Bacillus thuringiensis*, jamur, virus, dan agen hayati lain sebagai bagian dari strategi perlindungan tanaman yang lebih berkelanjutan. ([MDPI](#))

Namun, perjalanan dari laboratorium ke lahan tidak mudah. Di laboratorium, jamur entomopatogen dapat menunjukkan mortalitas tinggi terhadap serangga target dalam kondisi suhu, kelembapan, dan konsentrasi spora yang terkontrol. Di lahan, efektivitasnya dipengaruhi sinar ultraviolet, kelembapan, curah hujan, cara aplikasi, kualitas formulasi, umur simpan produk, dan perilaku petani. Oleh karena itu, penemuan

mikroba harus disertai inovasi formulasi: mikrokapsul, pembawa organik, perekat alami, perlindungan UV, dan metode aplikasi yang sesuai dengan kondisi lokal.

Di tingkat desa, biopestisida mikroba dapat dikembangkan melalui unit produksi agen hayati. Misalnya, kelompok tani dapat memperbanyak *Trichoderma* untuk kebun lada, kakao, atau hortikultura. Kementerian Pertanian mencatat contoh kegiatan PHT perkebunan yang melibatkan aplikasi metabolit sekunder agen hayati, perbanyak jamur antagonis, pembuatan kompos, dan sanitasi kebun. (ditjenbun.pertanian.go.id) Ini memperlihatkan bahwa inovasi mikroba tidak harus selalu berakhir sebagai produk mahal dari industri, tetapi juga dapat menjadi teknologi komunitas bila standar mutu dan pendampingan tersedia.

5. Penemuan Modern Kedua: Mikrobioma Tanaman

Perkembangan ilmu mikrobioma mengubah cara ilmuwan memahami kesehatan tanaman. Tanaman bukan individu tunggal yang hidup sendiri, melainkan “holobiont”, yaitu organisme yang hidup bersama komunitas mikroba di akar, daun, batang, dan tanah sekitarnya. Mikroba dapat membantu tanaman menyerap hara, menekan patogen, memicu sistem imun, dan meningkatkan toleransi terhadap stres lingkungan.

Kajian terbaru tentang resistensi penyakit berbasis mikrobioma menunjukkan bahwa mikrobioma tanaman dapat memberikan perlindungan melalui penghambatan langsung terhadap patogen, kompetisi sumber daya, serta aktivasi respons imun tanaman. Praktik pertanian seperti rotasi tanaman, tumpangsari, varietas tahan, biokontrol, dan pertanian organik dapat memodulasi mikrobioma sehingga memengaruhi resistensi tanaman. ([Springer Link](#))

Implikasinya bagi PHT sangat besar. Jika dahulu perlindungan tanaman lebih banyak berfokus pada membunuh hama atau patogen, kini strategi modern mulai menekankan “membangun daya tahan sistem”. Tanah sehat,

bahan organik, kompos matang, rotasi tanaman, tanaman penutup tanah, pengurangan pestisida berlebihan, dan inokulan mikroba bukan sekadar praktik konservasi, tetapi bagian dari perlindungan tanaman.

Dalam konteks Indonesia, pendekatan mikrobioma relevan untuk lahan tropis yang memiliki biodiversitas tinggi tetapi rentan terhadap degradasi tanah. Banyak lahan pertanian intensif mengalami penurunan bahan organik, pemadatan, ketidakseimbangan hara, dan kehilangan mikroba bermanfaat akibat input kimia yang tidak seimbang. PHT berbasis mikrobioma mendorong petani melihat tanah bukan sekadar media tanam, tetapi ekosistem hidup. Tanah yang sehat menjadi “benteng biologis” pertama melawan hama dan penyakit.

6. Penemuan Modern Ketiga: Pestisida Nabati dan Kimia Hijau

Pestisida nabati bukan penemuan baru dalam sejarah manusia, tetapi ilmu modern membuatnya lebih terukur. Tanaman seperti mimba, serai wangi, sirsak, pepaya, tembakau, cengkeh, lengkuas, dan berbagai tanaman lokal mengandung senyawa metabolit sekunder yang dapat menghambat makan, pertumbuhan, reproduksi, atau perkembangan serangga. Penemuan modern terletak pada isolasi senyawa aktif, standardisasi ekstrak, formulasi stabil, uji toksisitas, dan integrasi dengan PHT.

Di Indonesia, potensi pestisida nabati cukup besar karena keanekaragaman hayati tropis menyediakan banyak sumber senyawa bioaktif. Studi meta-analisis tentang penggerek buah kopi menunjukkan bahwa pestisida botani memiliki prospek dalam pengendalian *coffee berry borer* di Indonesia; penelitian tersebut menganalisis berbagai famili tanaman dan menemukan bahwa paparan pestisida nabati berpengaruh signifikan terhadap mortalitas hama tersebut. (jhpttropika.fp.unila.ac.id)

Namun, pestisida nabati juga memiliki keterbatasan. Konsentrasi bahan aktif dapat bervariasi tergantung umur tanaman, lokasi tumbuh, metode ekstraksi, dan penyimpanan. Efeknya sering lebih lambat dibanding

pestisida sintetis. Sebagian bersifat repelen atau antifeedant, bukan langsung mematikan. Oleh sebab itu, pestisida nabati harus diposisikan sebagai bagian dari strategi terpadu, bukan solusi tunggal.

Narasi praktisnya dapat dilihat pada kebun kopi rakyat. Petani menghadapi penggerek buah kopi yang sulit dikendalikan karena larva berkembang di dalam buah. Pestisida kimia sering kurang efektif karena tidak mudah menjangkau hama di dalam buah, sementara penyemprotan berlebihan berisiko merusak lingkungan kebun. Dalam PHT modern, petani dapat mengombinasikan sanitasi buah terserang, perangkap atraktan, konservasi musuh alami, pemangkasan untuk memperbaiki mikroklimat, dan aplikasi pestisida nabati tertentu. Dengan demikian, pestisida nabati bukan sekadar “ramuan tradisional”, tetapi bagian dari desain ekologis.

7. Penemuan Modern Keempat: Feromon dan Manipulasi Perilaku Hama

Serangga berkomunikasi melalui sinyal kimia. Feromon seksual, feromon agregasi, dan senyawa volatil tanaman dapat digunakan untuk memantau atau mengganggu perilaku hama. Inovasi ini melahirkan perangkap feromon, *mass trapping*, *attract-and-kill*, dan *mating disruption*. Strategi ini sangat sesuai dengan PHT karena bersifat spesifik dan tidak banyak mengganggu organisme bukan sasaran.

Feromon bekerja dengan mengubah perilaku, bukan semata-mata membunuh. Dalam *mating disruption*, feromon sintetis dilepaskan ke lahan dalam jumlah tertentu sehingga serangga jantan kesulitan menemukan betina. Akibatnya, perkawinan berkurang dan populasi generasi berikutnya menurun. Dalam perangkap monitoring, feromon membantu petani mengetahui kapan populasi hama mulai meningkat sehingga pengendalian dapat dilakukan tepat waktu.

Pendekatan berbasis perilaku sangat penting karena banyak keputusan pengendalian gagal akibat waktu yang tidak tepat. Petani menyemprot

ketika kerusakan sudah terjadi, padahal fase rentan hama telah berlalu. Dengan perangkat feromon, keputusan dapat dibuat sebelum serangan mencapai tingkat berat. Inilah esensi PHT modern: mencegah lebih baik daripada bereaksi terlambat.

Di Indonesia, teknologi feromon relevan untuk komoditas hortikultura, perkebunan, dan tanaman pangan. Misalnya perangkat lalat buah pada cabai dan mangga, perangkat penggerek batang, atau atraktan penggerek buah kopi. Tantangannya adalah biaya, ketersediaan produk berkualitas, pemahaman cara pemasangan, dan perlunya koordinasi kawasan. Feromon lebih efektif bila diterapkan luas, bukan hanya oleh satu petani di tengah hamparan yang tidak dikelola bersama.

8. Penemuan Modern Kelima: Kecerdasan Buatan dan Pertanian Presisi

Kecerdasan buatan mengubah PHT dari sistem pengamatan manual menjadi sistem prediktif dan presisi. Kamera, citra drone, sensor IoT, perangkat pintar, data cuaca, dan model pembelajaran mesin dapat membantu mendeteksi hama lebih dini, mengenali spesies, menghitung populasi, memprediksi ledakan, dan memberikan rekomendasi pengendalian.

Kajian tentang peran AI dalam kerangka "4R pest management" menekankan empat prinsip: identifikasi hama yang tepat, pemilihan metode yang tepat, waktu pengendalian yang tepat, dan tindakan yang tepat. AI dapat membantu pengenalan hama, pemantauan real-time, analitik prediktif, pemilihan tindakan, serta integrasi dengan drone, sensor jarak jauh, dan perangkat pintar. ([MDPI](#))

Contoh konkret tampak pada penelitian deteksi hama tomat yang mengintegrasikan YOLOv8 dan model bahasa. Studi tersebut melaporkan kinerja deteksi yang tinggi dan menunjukkan potensi sistem berbasis AI untuk memberikan rekomendasi real-time kepada produsen yang tidak selalu memiliki akses langsung ke ahli perlindungan tanaman. ([Frontiers](#))

Bagi petani kecil, sistem seperti ini dapat menjadi “penyuluh digital” jika dikembangkan dengan bahasa lokal, data lokal, dan antarmuka sederhana.

Namun, AI bukan tanpa risiko. Model AI dapat salah mengenali hama jika data pelatihannya tidak mewakili kondisi lokal. Foto daun yang buruk, pencahayaan lemah, varietas berbeda, atau gejala campuran dapat menyebabkan kesalahan diagnosis. AI juga membutuhkan infrastruktur digital, koneksi internet, perangkat, dan literasi pengguna. Karena itu, AI dalam PHT harus dipahami sebagai alat bantu keputusan, bukan pengganti total pengetahuan agronomis.

Bagi Indonesia, AI-PHT sangat menjanjikan tetapi harus dirancang inklusif. Petani kecil tidak selalu mampu membeli drone atau sensor mahal. Maka, model yang lebih realistis adalah layanan bersama berbasis koperasi, BUMDes, penyuluh, kampus, atau startup agritech lokal. Data hama dapat dikumpulkan dari hamparan desa, dianalisis oleh sistem, lalu diterjemahkan menjadi rekomendasi sederhana: “amati ulang tiga hari lagi”, “lestarikan musuh alami”, “pasang perangkap”, atau “gunakan pengendalian selektif karena ambang kendali terlampaui”.

9. Penemuan Modern Keenam: RNA Interference sebagai Biopestisida Molekuler

RNA interference atau RNAi merupakan salah satu terobosan paling menarik dalam pengendalian hama modern. Prinsipnya adalah membungkam ekspresi gen penting pada hama melalui molekul RNA untai ganda. Jika gen yang dibungkam berperan dalam pertumbuhan, reproduksi, pencernaan, atau kelangsungan hidup hama, maka populasi hama dapat ditekan secara lebih spesifik.

Tinjauan ilmiah terbaru menyebut RNAi sebagai pendekatan yang memungkinkan pengendalian berbasis pembungkaman gen target. Dalam konteks biopestisida RNAi, aplikasi topikal dsRNA dipandang sebagai alternatif yang tidak selalu melibatkan modifikasi genetik tanaman,

sehingga berbeda dari tanaman transgenik. Kajian tentang persepsi publik terhadap biopestisida RNAi mencatat bahwa RNAi berbasis aplikasi topikal dipandang sebagai pendekatan baru yang menjawab tantangan resistensi, toksisitas, dan dampak pestisida sintetis, tetapi tetap memerlukan perhatian terhadap regulasi, keselamatan, biaya, dampak bukan sasaran, dan penerimaan sosial. ([Nature](#))

Kekuatan RNAi adalah presisi. Secara teoritis, molekul RNA dapat dirancang agar hanya menargetkan urutan genetik spesies hama tertentu. Hal ini berbeda dari pestisida kimia spektrum luas yang dapat mengenai banyak organisme. Tetapi presisi ini juga menuntut data genomik yang kuat. Jika urutan target tidak unik, ada potensi dampak bukan sasaran. Jika hama cepat memecah RNA atau tidak menyerapnya dengan baik, efektivitas menurun. Selain itu, RNA mudah terdegradasi oleh sinar matahari dan enzim lingkungan, sehingga teknologi formulasi menjadi sangat penting.

Dalam narasi “dari laboratorium ke lahan”, RNAi menggambarkan jarak yang kompleks. Di laboratorium, ilmuwan dapat menentukan gen target, menyintesis dsRNA, dan menguji mortalitas hama. Di lahan, keberhasilan bergantung pada stabilitas molekul, cara aplikasi, biaya produksi, penerimaan petani, regulasi, dan evaluasi ekologis. Oleh sebab itu, RNAi adalah contoh teknologi yang sangat menjanjikan tetapi harus dikawal dengan tata kelola adaptif.

10. Penemuan Modern Ketujuh: CRISPR dan Pengeditan Gen

CRISPR-Cas membuka kemungkinan baru dalam pengendalian hama dan peningkatan ketahanan tanaman. Teknologi ini dapat digunakan untuk mengedit gen tanaman agar lebih tahan terhadap hama atau penyakit, mengubah sifat hama tertentu, atau bahkan mengembangkan sistem *gene drive* yang memengaruhi populasi hama. Tinjauan ilmiah mengenai RNAi dan CRISPR menyatakan bahwa RNAi dapat menyebabkan *gene knockdown*

yang bersifat sementara, sedangkan CRISPR memungkinkan modifikasi genetik yang presisi untuk meningkatkan sifat serangga bermanfaat atau mengganggu gen penting pada hama; namun penerapannya memerlukan pertimbangan biosafety dan tata kelola adaptif, terutama untuk sistem yang dapat menyebar sendiri seperti *gene drive*. ([ScienceDirect](#))

CRISPR memiliki potensi besar tetapi juga paling sensitif secara etis dan ekologis. Jika digunakan untuk memperbaiki tanaman agar lebih tahan hama, risikonya relatif lebih mudah dikelola melalui regulasi benih dan biosafety tanaman. Namun, jika digunakan untuk mengubah populasi serangga di alam, terutama melalui *gene drive*, maka pertanyaannya jauh lebih luas: bagaimana jika gen menyebar melintasi batas wilayah? Bagaimana dampaknya terhadap rantai makanan? Siapa yang berhak memutuskan pelepasan organisme hasil rekayasa? Bagaimana mekanisme pemantauan jangka panjang?

Karena itu, dalam PHT, CRISPR sebaiknya tidak dipahami sebagai “peluru ajaib”. Ia adalah alat riset dan teknologi yang harus ditempatkan dalam prinsip kehati-hatian. PHT modern membutuhkan inovasi, tetapi inovasi harus tunduk pada etika ekologis, partisipasi publik, transparansi, dan evaluasi risiko.

11. Climate-Smart Pest Management

Perubahan iklim memperumit persoalan hama. Suhu yang meningkat dapat mempercepat siklus hidup serangga, memperluas wilayah sebaran hama, mengubah sinkronisasi antara hama dan musuh alami, serta meningkatkan stres tanaman sehingga tanaman lebih rentan. IPPC menekankan pentingnya surveilans dan monitoring kesehatan tanaman untuk mendeteksi masuknya hama baru atau memantau status hama dalam konteks perubahan iklim. ([Open Knowledge FAO](#))

Dalam iklim yang tidak stabil, PHT harus menjadi *climate-smart*. Artinya, sistem pengendalian hama tidak hanya menanggapi populasi hama saat

ini, tetapi juga memperhitungkan prediksi cuaca, pola musim, kelembapan, suhu, dan risiko migrasi hama. Model prediksi berbasis AI, data satelit, perangkat pintar, dan informasi cuaca lokal dapat membantu memperkirakan kapan hama akan meningkat.

Contoh sederhana dapat dilihat pada petani cabai. Pada musim tertentu, kelembapan tinggi dapat meningkatkan penyakit tanaman, sedangkan cuaca kering dapat mendukung perkembangan beberapa hama serangga. Dengan sistem PHT konvensional, petani mungkin baru bertindak setelah gejala parah. Dengan PHT modern, data cuaca dan pemantauan lapangan dapat memberi peringatan dini sehingga petani memperbaiki drainase, mengatur jarak tanam, memasang perangkat, atau memilih tindakan preventif sebelum kerugian membesar.

12. Peran Sekolah Lapang dan Literasi Petani

Teknologi paling canggih sekalipun tidak akan berhasil jika petani tidak memahami kapan, mengapa, dan bagaimana menggunakannya. Inilah alasan Sekolah Lapang tetap relevan di era AI dan bioteknologi. Bahkan, semakin canggih teknologi, semakin penting literasi petani agar mereka tidak menjadi pengguna pasif.

Sekolah Lapang PHT mengajarkan petani melihat lahan sebagai sistem. Mereka belajar membedakan hama dan musuh alami, memahami fase pertumbuhan tanaman, menghitung populasi, membaca gejala, dan mendiskusikan keputusan. FAO menekankan bahwa pendekatan Sekolah Lapang berbasis analisis masalah komunitas dan kurikulum lokal; model ini pertama kali dikembangkan di Indonesia untuk PHT padi dan kemudian diadaptasi di banyak negara. ([FAOHome](#))

Dalam era modern, Sekolah Lapang dapat diperbarui menjadi "Sekolah Lapang Digital-Ekologis". Petani tidak hanya membawa kaca pembesar dan buku catatan, tetapi juga ponsel, aplikasi identifikasi hama, data cuaca, foto gejala, dan akses ke penyuluh digital. Namun, pendekatan partisipatif tetap

penting. Teknologi digital tidak boleh menggantikan diskusi kelompok, pengalaman lokal, dan pengetahuan petani senior.

Bayangkan satu kelompok tani di Jawa Barat. Setiap minggu mereka mengamati hamparan padi. Sebagian anggota memotret serangga dengan ponsel, aplikasi membantu identifikasi awal, penyuluh memverifikasi, lalu kelompok mendiskusikan apakah perlu tindakan. Jika musuh alami masih tinggi dan populasi hama rendah, mereka menunda pestisida. Jika ambang kendali terlampaui, mereka memilih opsi selektif. Inilah bentuk PHT modern: keputusan manusia diperkuat data digital.

13. PHT dalam Konteks Indonesia

Indonesia memiliki karakteristik yang membuat PHT sangat penting. Pertama, Indonesia adalah negara tropis dengan biodiversitas tinggi, tetapi juga tekanan hama yang tinggi sepanjang tahun. Tidak seperti wilayah subtropis yang memiliki musim dingin untuk menekan populasi serangga tertentu, banyak wilayah tropis memungkinkan hama berkembang lebih kontinu. Kedua, struktur pertanian Indonesia didominasi petani kecil dengan variasi lahan, modal, akses informasi, dan kapasitas teknologi. Ketiga, Indonesia memiliki komoditas strategis yang rentan terhadap hama: padi, jagung, kedelai, cabai, bawang, kopi, kakao, sawit, lada, cengkeh, dan hortikultura.

Kementerian Pertanian menyebut PHT sebagai konsep yang memadukan taktik pengendalian dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, ekologi, dan sosial; PHT juga dihubungkan dengan mandat hukum dalam sistem budidaya tanaman dan pertanian berkelanjutan. (ditjenbun.pertanian.go.id) Hal ini menunjukkan bahwa PHT bukan hanya pilihan teknis, melainkan bagian dari kebijakan pertanian nasional.

Namun, tantangan Indonesia cukup besar. Di banyak wilayah, petani masih menganggap pestisida sebagai asuransi panen. Toko saprodi sering menjadi sumber utama informasi. Penyuluh terbatas. Produk biopestisida

belum selalu konsisten kualitasnya. Pestisida nabati sering belum terstandarisasi. Pengamatan hama membutuhkan waktu. Harga pasar sering menekan petani untuk memilih tindakan cepat. Karena itu, kebijakan PHT harus menyentuh ekosistem pendukung: penyuluhan, laboratorium hayati, sertifikasi produk, insentif pasar, koperasi, sistem peringatan dini, dan pembiayaan teknologi.

14. Studi Kasus Naratif: Sawah Padi dan Wereng

Sebuah desa padi menghadapi peningkatan populasi wereng. Pada masa lalu, reaksi umum adalah menyemprot insektisida segera. Namun, pengalaman menunjukkan bahwa penyemprotan sembarangan dapat membunuh laba-laba, kumbang predator, dan parasitoid telur. Akibatnya, setelah beberapa minggu, wereng dapat muncul lebih kuat karena musuh alaminya menurun.

Dalam pendekatan PHT modern, kelompok tani melakukan pengamatan. Mereka menghitung populasi wereng per rumpun, mencatat umur tanaman, melihat keberadaan musuh alami, memeriksa varietas, dan menilai kondisi pemupukan nitrogen. Jika pemupukan nitrogen berlebihan, tanaman menjadi lebih lunak dan menarik bagi hama. Maka tindakan pertama bukan pestisida, tetapi koreksi budidaya: mengatur pemupukan, menjaga jarak tanam, mengelola air, dan mempertahankan musuh alami.

Jika populasi melampaui ambang kendali, petani memilih insektisida selektif dengan dosis tepat dan waktu tepat. Jika tersedia, agen hayati atau biopestisida dapat digunakan. Jika ada sistem digital, data populasi wereng dari beberapa petak dikumpulkan untuk memetakan risiko hamparan. Dengan cara ini, PHT tidak hanya menyelamatkan satu petak sawah, tetapi mengelola risiko kawasan.

15. Studi Kasus Naratif: Kopi, Penggerek Buah, dan Pestisida Nabati

Pada kebun kopi rakyat, penggerek buah kopi menjadi ancaman serius karena merusak biji dan menurunkan mutu. Petani yang hanya mengandalkan pestisida kimia sering kecewa karena hama berada di dalam buah sehingga sulit dijangkau. Dalam PHT, strategi lebih luas diperlukan.

Langkah pertama adalah sanitasi kebun: buah terserang dipetik dan dimusnahkan agar tidak menjadi sumber populasi baru. Kedua, naungan dan pemangkasan diatur agar kelembapan tidak berlebihan. Ketiga, perangkat atraktan dipasang untuk memantau dan menekan populasi. Keempat, pestisida nabati atau agen hayati digunakan sebagai pelengkap. Studi di Indonesia mengenai pestisida botani terhadap penggerek buah kopi menunjukkan bahwa bahan nabati memiliki prospek sebagai bagian dari pengendalian hama kopi, dengan hasil yang menunjukkan pengaruh signifikan terhadap mortalitas hama. (jhttropika.fp.unila.ac.id)

Kasus kopi menunjukkan bahwa PHT bukan satu tindakan, melainkan rangkaian tindakan. Penemuan laboratorium tentang senyawa nabati hanya efektif bila dipadukan dengan sanitasi, monitoring, manajemen tajuk, dan perilaku petani. PHT adalah seni menggabungkan banyak alat secara kontekstual.

16. Tata Kelola Risiko dan Etika Teknologi Baru

Penemuan modern membawa harapan, tetapi juga risiko. RNAi, CRISPR, AI, dan biopestisida baru memerlukan tata kelola. RNAi menimbulkan pertanyaan tentang dampak bukan sasaran, degradasi lingkungan, dan penerimaan publik. Kajian tentang persepsi publik terhadap biopestisida RNAi menunjukkan bahwa aspek keselamatan manusia dan lingkungan, biaya, dampak bukan sasaran, degradabilitas, resistensi, toksisitas, serta pertimbangan etis dan budaya memengaruhi penerimaan sosial teknologi tersebut. ([Nature](https://doi.org/10.1016/j.nature.2019.05.011))

AI juga memiliki persoalan etika. Siapa pemilik data lahan petani? Apakah data serangan hama dapat digunakan oleh perusahaan asuransi, pedagang

input, atau pembeli komoditas tanpa persetujuan petani? Bagaimana jika rekomendasi AI salah dan menyebabkan kerugian panen? Bagaimana memastikan model AI tidak hanya akurat di lahan percobaan, tetapi juga di lahan petani kecil?

CRISPR dan *gene drive* bahkan lebih sensitif. Teknologi yang dapat mengubah populasi organisme di alam harus melewati evaluasi ekologis, konsultasi publik, dan pengawasan jangka panjang. Tinjauan tentang RNAi dan CRISPR menekankan perlunya tata kelola adaptif berbasis risiko, terutama untuk sistem yang dapat menyebar sendiri. ([ScienceDirect](#))

Dalam perspektif manajemen, tata kelola PHT modern membutuhkan prinsip: kehati-hatian, transparansi, akuntabilitas, partisipasi, keadilan akses, dan evaluasi berkelanjutan. Teknologi perlindungan tanaman tidak boleh hanya menguntungkan perusahaan besar, tetapi harus memperkuat petani kecil dan menjaga ekosistem.

17. Hambatan Implementasi dari Laboratorium ke Lahan

Ada beberapa hambatan utama dalam menerjemahkan inovasi laboratorium ke lahan.

Pertama, hambatan teknis. Produk biopestisida memerlukan formulasi stabil. RNAi memerlukan sistem penghantaran yang mampu melindungi molekul. AI memerlukan data lokal berkualitas. Feromon memerlukan pemasangan tepat. Tanpa hal ini, teknologi tampak berhasil di publikasi ilmiah tetapi gagal di lahan.

Kedua, hambatan ekonomi. Petani kecil sensitif terhadap biaya. Teknologi yang mahal sulit diadopsi meskipun efektif. Oleh sebab itu, inovasi harus dihitung berdasarkan biaya-manfaat nyata, bukan hanya efektivitas biologis.

Ketiga, hambatan sosial. Petani mengadopsi teknologi jika percaya, melihat bukti, mendapat pendampingan, dan merasa risikonya wajar. Sekolah Lapang, demonstrasi plot, dan petani pelopor sangat penting.

Keempat, hambatan kelembagaan. PHT membutuhkan koordinasi hamparan. Jika satu petani menjaga musuh alami tetapi petani sebelah menyemprot pestisida spektrum luas, manfaat ekologis berkurang. Maka kelembagaan kelompok tani, koperasi, penyuluh, dan pemerintah daerah menjadi kunci.

Kelima, hambatan pasar. Jika pasar hanya menilai volume dan tampilan, petani cenderung memakai pestisida berlebihan untuk menghindari cacat visual. Jika pasar memberi insentif pada produk rendah residu, ramah lingkungan, atau bersertifikat, PHT akan lebih menarik.

18. Agenda Masa Depan PHT di Indonesia

Masa depan PHT Indonesia perlu diarahkan pada beberapa agenda strategis.

Pertama, membangun sistem peringatan dini hama nasional berbasis data. Data dari penyuluh, petani, drone, perangkat pintar, cuaca, dan citra satelit perlu diintegrasikan untuk memetakan risiko hama secara real-time.

Kedua, memperkuat laboratorium hayati daerah. Setiap sentra komoditas sebaiknya memiliki dukungan laboratorium untuk agen hayati, diagnosis penyakit, identifikasi hama, dan validasi biopestisida.

Ketiga, mengembangkan Sekolah Lapang PHT generasi baru. Kurikulumnya harus memadukan agroekologi, literasi digital, perubahan iklim, keamanan pestisida, ekonomi usaha tani, dan pemasaran produk sehat.

Keempat, memperkuat riset lokal. Banyak teknologi global tidak otomatis cocok dengan kondisi tropis Indonesia. Diperlukan riset spesifik untuk komoditas lokal, varietas lokal, mikroklimat lokal, dan perilaku petani lokal.

Kelima, membangun model bisnis inklusif. Drone, sensor, AI, dan laboratorium tidak harus dimiliki individu petani. Teknologi dapat disediakan sebagai layanan bersama oleh koperasi, BUMDes, perguruan tinggi, startup, atau pemerintah daerah.

Keenam, memperkuat regulasi adaptif. Biopestisida, RNAi, CRISPR, dan AI pertanian membutuhkan regulasi yang melindungi masyarakat tanpa menghambat inovasi. Regulasi harus berbasis risiko, transparan, dan melibatkan publik.

19. Kesimpulan

Pengelolaan Hama Terpadu telah berkembang dari pendekatan ekologis klasik menjadi sistem perlindungan tanaman modern yang memadukan biologi, teknologi digital, bioteknologi, ekonomi, dan pembelajaran sosial. PHT bukan sekadar mengurangi pestisida, tetapi mengubah cara manusia memahami hubungan antara tanaman, hama, musuh alami, tanah, iklim, dan keputusan petani.

Penemuan modern seperti biopestisida mikroba, mikrobioma tanaman, pestisida nabati terstandar, feromon, AI, drone, sensor IoT, RNAi, dan CRISPR membuka peluang baru untuk pengendalian hama yang lebih presisi dan ramah lingkungan. Namun, teknologi tersebut tidak otomatis berhasil. Ia harus diuji dalam kondisi lapangan, disesuaikan dengan konteks lokal, diterima petani, didukung kelembagaan, dan dikawal regulasi.

Indonesia memiliki modal penting: sejarah Sekolah Lapang PHT, biodiversitas tinggi, pengalaman petani, jaringan penyuluhan, serta kebutuhan besar untuk pertanian berkelanjutan. Tantangannya adalah memperbarui PHT agar sesuai dengan era perubahan iklim, digitalisasi, dan ketahanan pangan. Dalam makna terdalam, "dari laboratorium ke lahan" bukan hanya perpindahan teknologi, tetapi dialog antara sains dan kehidupan nyata petani.

Masa depan PHT terletak pada integrasi: antara laboratorium dan sawah, antara AI dan kearifan lokal, antara bioteknologi dan etika, antara produktivitas dan ekologi, serta antara inovasi dan keadilan sosial. PHT yang baik bukan hanya membuat hama terkendali, tetapi juga membuat petani lebih mandiri, lingkungan lebih sehat, dan sistem pangan lebih tangguh.

Glosarium

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

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

Ambang ekonomi: Tingkat populasi hama atau kerusakan tanaman ketika kerugian ekonomi yang ditimbulkan lebih besar daripada biaya pengendalian.

Biopestisida: Bahan pengendali hama yang berasal dari organisme hidup, metabolit biologis, atau bahan alami.

CRISPR-Cas: Teknologi pengeditan gen yang memungkinkan perubahan DNA secara lebih presisi.

Feromon: Senyawa kimia yang digunakan serangga untuk berkomunikasi, misalnya untuk menarik pasangan.

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

Kecerdasan buatan: Sistem komputasi yang mampu mengenali pola, membuat prediksi, atau memberi rekomendasi berdasarkan data.

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

Musuh alami: Organisme yang memangsa, memarasit, atau menginfeksi hama secara alami.

Pestisida nabati: Pestisida yang berasal dari ekstrak tanaman atau senyawa metabolit tumbuhan.

PHT/IPM: Pendekatan pengelolaan hama yang mengintegrasikan berbagai teknik pengendalian berdasarkan prinsip ekologi, ekonomi, dan sosial.

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

Sekolah Lapang PHT: Metode pembelajaran petani berbasis observasi langsung di lahan, diskusi kelompok, dan eksperimen lapangan.

Sensor IoT: Perangkat digital yang terhubung ke internet untuk mengumpulkan data lapangan seperti suhu, kelembapan, atau keberadaan hama.

Daftar Pustaka APA 7

Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2022). *Sosialisasi penerapan Pengendalian Hama Terpadu tanaman lada di Provinsi Kalimantan Barat*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

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

FAO. (n.d.). *Farmer Field School*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Faber, N. R., et al. (2025). Leveraging advances in RNAi and CRISPR for improved biological pest control. *Current Opinion in Insect Science*.

Khodijah, S., Anggraini, R. T., Andrianto, E., Lestari, P., & Afandi, A. (2024). The efficacy of botanical pesticides in controlling coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae): A meta-analysis. *Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan Tropika*, 24, 58–65.

Tardin-Coelho, R., Fletcher, S., Manzie, N., Gunasekara, S. N., Fidelman, P., Mitter, N., & Ashworth, P. (2025). A systematic review on public perceptions of RNAi-based biopesticides: Developing social licence to operate. *npj Sustainable Agriculture*, 3, Article 15.

Şahin, Y. S., Gençer, N. S., & Şahin, H. H. (2025). Integrating AI detection and language models for real-time pest management in tomato cultivation. *Frontiers in Plant Science*.

Yang, H., et al. (2025). AI roles in 4R crop pest management: A review. *Agronomy*, 15(7), 1629.

Du, Y., et al. (2025). Microbiome-mediated plant disease resistance: Recent advances and future directions. *Journal of General Plant Pathology*.

Verma, M. L., et al. (2024). Microbial production of biopesticides for sustainable agriculture. *Sustainability*, 16(17), 7496.

International Plant Protection Convention. (2024). *Management of climate-change impacts on plant health*. IPPC Secretariat.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *About FAO's work on plant production and protection*. FAO.

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>