

PENGENDALIAN HAMA BERASAL TUMBUHAN: PERSPEKTIF MOLEKULER, EKOLOGI & TEKNOLOGI**Permata Ika Hidayati¹, As'ad Syamsul Arifin²**

Universitas Insan Budi Utomo

permatahidayati@gmail.com**Abstrak**

Tujuan: Untuk mengeksplorasi dan mensintesis pengetahuan terkini tentang pengelolaan hama botani, menekankan interaksi hama tanaman dari perspektif evolusi, molekuler, dan ekologi. Studi ini mengevaluasi senyawa nabati dan pendekatan bioteknologi sebagai alternatif berkelanjutan terhadap pestisida sintetis. **Desain Studi:** Tinjauan komprehensif literatur ilmiah tentang pengelolaan hama botani, dengan fokus pada pendekatan interdisipliner. **Metodologi:** Studi ini meninjau data tentang pertahanan kimia tanaman, interaksi molekuler, dan inovasi bioteknologi untuk pengendalian hama berkelanjutan. Laporan ini menganalisis kemampuan senyawa yang berasal dari tumbuhan dalam mengganggu fisiologi hama dengan dampak ekologis yang minimal. Wawasan dari genomik, biologi molekuler, dan ekologi diintegrasikan untuk mengusulkan kerangka pengelolaan hama berkelanjutan. **Hasil:** Pestisida nabati menunjukkan efektivitas dalam menargetkan jalur fisiologis hama sekaligus mengurangi gangguan ekologi. Studi molekuler mengungkapkan interaksi signifikan antara senyawa yang berasal dari tumbuhan dan sistem hama, didukung oleh metode bioteknologi canggih. Penelitian genomik dan ekologi menggarisbawahi pendekatan yang seimbang untuk meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus meminimalkan kerusakan lingkungan. **Kesimpulan:** Pengendalian hama tumbuhan merupakan alternatif yang menjanjikan dan berkelanjutan dibandingkan pestisida sintetis. Hal ini mengatasi tantangan pertanian saat ini sekaligus mendorong keberlanjutan ekologi jangka panjang. Temuan ini menyoroti potensi strategi berbasis tanaman untuk memajukan metode pengendalian hama yang tepat dan ramah lingkungan yang selaras dengan tujuan keberlanjutan global. Penelitian lebih lanjut sangat penting untuk memvalidasi dan memperluas solusi ini di berbagai sistem pertanian.

Sejarah Artikel*Submitted: 20 Januari 2025**Accepted: 25 Januari 2025**Published: 26 Januari 2025***Kata Kunci***Pestisida nabati, Mekanisme pertahanan tanaman, Pertanian berkelanjutan, Pengelolaan hama, Interaksi ekologis***PENDAHULUAN****Evolusi Pertahanan Kimia Tanaman**

Selama jutaan tahun, tanaman telah mengembangkan berbagai mekanisme pertahanan kimia terhadap hama (Huot et al., 2013; Zhu-Salzman et al., 2005). Pertahanan ini mencakup strategi konstitutif dan dapat diinduksi untuk melindungi terhadap patogen dan serangga herbivora (Arnason & Bernards, 2010; Fürstenberg-Hägg et al., 2013). Pertahanan konstitutif terdiri dari penghalang yang telah terbentuk sebelumnya, seperti cutin dan suberin, dan inhibitor aktif biologis yang selalu ada dalam jaringan tanaman (Arnason & Bernards, 2010). Pertahanan yang dapat diinduksi diaktifkan saat serangan hama, yang melibatkan proses fisiologis dan biokimia yang kompleks seperti jalur asam jasmonat dan asam salisilat, fluks kalsium, ledakan spesies oksigen reaktif, dan aktivasi protein kinase yang diaktifkan mitogen (Wang et al., 2023). Tanaman menghasilkan berbagai molekul bioaktif, termasuk senyawa antimikroba, antifeedant, dan fototoksik, untuk melawan strategi hama yang berkembang (Arnason & Bernards, 2010; Fürstenberg-Hägg et al., 2013). Mereka juga telah mengembangkan strategi hemat biaya seperti memproduksi trikoma kelenjar, lateks, mengumpulkan metabolit spesifik, dan mempersiapkan jalur pertahanan terlebih dahulu untuk penularan ke keturunannya (Zhou et al., 2022). Beberapa tanaman melibatkan organisme eksternal atau bekerja sama dengan kerabatnya untuk perlindungan, sehingga mengurangi

biaya pertahanan (Zhou et al., 2022). Perlombaan senjata evolusioner dengan hama telah menghasilkan mekanisme pertahanan yang beragam dan berlebihan, yang penting untuk memperlambat resistensi hama terhadap pertahanan tanaman inang (Arnason & Bernards, 2010; Huot et al., 2013).

Jalur Biokimia dalam Ketahanan Tanaman

Strategi ketahanan tanaman melibatkan jalur biokimia rumit yang terdiri dari molekul pemberi sinyal, hormon, dan metabolit, yang mengarah pada senyawa pertahanan dan respons imun. Fitohormon, seperti asam salisilat, asam jasmonat, etilen, dan asam absisat, mengatur respons terhadap patogen seperti *Botrytis cinerea* (Abuqamar et al., 2017). Asam salisilat, yang penting untuk resistensi, disintesis melalui jalur isokorismat dan fenilalanin amonia-lyase (Ding & Ding, 2020). Asam pipolat, yang berasal dari katabolisme lisin, meningkatkan respons pertahanan dan resistensi yang didapat secara sistemik (Zeier, 2013). Metabolisme asam amino, khususnya biosintesis asam amino turunan Asp, menyebabkan resistensi patogen, dengan ketidakseimbangan kadar homoserin atau treonin berpotensi meningkatkan ketebalan terhadap oomycetes (Zeier, 2013). Phyto-oxylipins, dihasilkan oleh transformasi oksidatif asam lemak tak jenuh, berkontribusi pada mekanisme pertahanan (Blée, 2002). Memahami jaringan biokimia yang kompleks ini sangat penting untuk mengembangkan peningkatan resistensi melalui rekayasa genetika dan pemuliaan (Abuqamar et al., 2017; Jirschitzka et al., 2012).

Wawasan genom terhadap interaksi tanaman-hama

Analisis genomik komparatif berfungsi sebagai alat yang ampuh untuk menjelaskan prinsip universal interaksi hama tanaman. Melalui pemanfaatan pengurutan hasil tinggi dan bioinformatika, mekanisme genetik yang dilestarikan dalam pertahanan tanaman dan virulensi hama di seluruh spesies dapat diidentifikasi. (Sironi dkk., 2015; Sturdevant dkk., 2010). Penelitian telah menunjukkan bahwa gen yang terlibat dalam pertahanan tanaman dan virulensi patogen bersifat sangat polimorfik, mencerminkan perlombaan senjata evolusioner antara tanaman dan hama (Karasov et al., 2014). Keanekaragaman genetik ini dihasilkan dari interaksi ekologi yang kompleks dan tekanan selektif. Analisis komparatif telah mengungkap respons ekspresi gen umum dalam sel inang terhadap berbagai rangsangan infeksi, yang menunjukkan beberapa mekanisme pertahanan universal (Diehn & Relman, 2001). Namun, sering kali terdapat keterputusan antara interaksi hama tanaman di dunia nyata dan model sederhana yang digunakan (Karasov et al., 2014). Untuk mengatasi hal ini, pendekatan integratif yang menggabungkan genomik dengan transkriptomik, proteomik, dan metabolomik digunakan untuk menilai resistensi serangga pada berbagai tingkat biologis (Gado dan Alviar, 2022). Metode baru, seperti menggunakan pembacaan sekuensing non-target sebagai proksi fenotipe, menjanjikan untuk mempelajari variasi alami ketahanan hama tanaman secara efisien (Galanti et al., 2024). Kemajuan dalam genomik ekologi kemungkinan besar akan mengungkap prinsip-prinsip universal yang mengatur interaksi hama dan tanaman.

Keanekaragaman Molekuler Dan Mekanisme Aksi

Struktur dan Khasiat Pestisida Berasal dari Tumbuhan

Pestisida yang berasal dari tumbuhan memiliki ciri struktural yang mempengaruhi kemanjuran pengendalian hama. Pestisida nabati mengandung berbagai komponen aktif yang berkontribusi terhadap beragam cara kerja dan efektivitas (Miresmailli, 2013; Oliveira dkk., 2019). Komponen-komponen ini seringkali bersinergi untuk meningkatkan aktivitas dan mengurangi resistensi hama (Koul & Walia, 2009; Oliveira et al., 2019). Struktur kimianya mempengaruhi stabilitas, volatilitas, dan mekanisme pelepasan, sehingga berdampak pada

kemanjuran (Miresmailli, 2013; Oliveira et al., 2019). Pelepasan eugenol dan cinnamaldehyde dari nanopartikel sensitif terhadap suhu, sehingga mempengaruhi bioavailabilitas (Oliveira et al., 2019). Protein pengikat bau (OBP) pada organ sensorik serangga mengikat dan mengangkut molekul bau hidrofobik, sehingga memengaruhi perilaku seperti lokasi inang, perkawinan, dan posisi bertelur (Rana et al., 2024). Kemanjuran pestisida nabati bervariasi menurut spesies hama; Insektisida yang berasal dari tembakau lebih efektif melawan kutu daun jeruk dibandingkan kutu daun jeruk (Wuryantini dkk., 2021). Pola volatilisasi obat nyamuk nabati dapat bervariasi seiring waktu dan faktor seperti jenis kelamin, etnis, dan kondisi kulit (Miresmailli, 2013). Memahami faktor-faktor ini sangat penting untuk mengembangkan pestisida nabati yang efektif dan berkelanjutan untuk pengelolaan hama terpadu (Dao et al., 2021; Oliveira et al., 2019; Villaverde et al., 2016).

Variasi Fitokimia dalam Pengendalian Hama

Variasi fitokimia secara signifikan mempengaruhi strategi pengelolaan hama dan efektivitas pengelolaan hama terpadu (PHT). Pemanfaatan fitokimia melalui resistensi tanaman inang sangat penting untuk PHT, khususnya pada tanaman lapangan seperti jagung dan alfalfa, dimana penggunaan insektisida seringkali tidak ekonomis (Horn, 2019). Namun, suhu ekstrem dapat menyebabkan stres pada arthropoda dan tanaman inang, sehingga berpotensi mengubah mekanisme resistensi mereka (Horn, 2019). Ekologi kimia, termasuk feromon dan semiokimia, menawarkan alternatif yang menjanjikan terhadap racun berspektrum luas (Pickett et al., 1997). Metode berbasis fitokimia dapat diintegrasikan dengan bahan penyamar inang, repelan, antifeedant, atau pencegah oviposisi dalam pendekatan multifaset yang dikenal sebagai strategi pengalih stimulo-deterrent (SDDS) untuk memanipulasi perilaku hama dan mengurangi penggunaan pestisida konvensional (Pickett dkk., 1997). Memasukkan ketahanan tanaman inang, semiokimia, dan metode berbasis fitokimia lainnya ke dalam program PHT sejalan dengan preferensi masyarakat terhadap alternatif pengendalian hama bio-rasional (VanRyckeghem, 2011) dan mendukung pengembangan praktik pertanian yang inovatif dan berkelanjutan.

Interaksi Molekuler dalam Gangguan Hama

Interaksi molekuler yang mengganggu fisiologi hama melibatkan berbagai mekanisme. SubCELL, database interaksi spesifik kompartemen subseluler (SCSI) antara DNA, RNA, dan protein, memfasilitasi pemahaman dan potensi gangguan fisiologi hama pada tingkat molekuler (Zhang et al., 2024). Kairomones memediasi seleksi tanaman inang dan meningkatkan efektivitas musuh alami dalam biokontrol (Murali-Baskaran et al., 2017). Penanda molekuler mempelajari genetika hama, dinamika populasi, dan hubungan predator-mangsa untuk mengidentifikasi target molekuler (Ibrahim et al., 1997). Memodifikasi hubungan simbiosis bakteri pada hama heteroptera melalui paratransgenesis dapat menghasilkan metode pengendalian baru (Prado & Zucchi, 2012). Perubahan iklim mengubah fisiologi dan perilaku hama melalui sifat termal dan interaksi lingkungan, sehingga mempengaruhi persaingan tanaman gulma dan pola pemberian makan (Patterson et al., 1999; Terblanche et al., 2015). Menargetkan SCSI, perilaku yang dimediasi kairomone, hubungan simbiosis, dan perubahan yang disebabkan oleh iklim, dibantu oleh biologi molekuler, biokimia, dan studi lingkungan, menawarkan strategi pengendalian hama yang lebih baik.

Interaksi Dan Keberlanjutan Tingkat Ekosistem Dampak Ekologis dari Pestisida Tumbuhan

Pestisida nabati, yang berasal dari senyawa tumbuhan, merupakan alternatif yang menjanjikan dibandingkan pestisida sintetik, yang memodulasi jaringan ekologi dengan

dampak buruk yang minimal terhadap organisme non-target dan lingkungan (Jyoti, 2024; Ahmed et al., 2022). Dengan menargetkan hama tertentu, pestisida ini hanya meninggalkan sedikit residu dan memiliki sifat insektisida, antifeedant, atau pengusir nyamuk, sehingga ideal untuk produksi pangan organik dan perlindungan pasca panen (Ahmed dkk., 2022). Pestisida nabati tidak terlalu mengganggu interaksi trofik dan ekosistem dibandingkan dengan pestisida sintetik, sehingga lebih selaras dengan strategi pengelolaan hama terpadu (Beringue dkk., 2024; Jyoti, 2024). Namun, dampaknya terhadap keanekaragaman hayati mikroba tanah bervariasi, beberapa ekstrak mengalami penurunan dan yang lainnya meningkatkan populasi mikroba (Salamiah & Aidawati , 2022), yang menyoroti kompleksitas jaringan ekologi dan perlunya pertimbangan yang cermat saat menggunakan pestisida ini. Pestisida nabati menawarkan pendekatan pengelolaan hama yang selektif dan ramah lingkungan, namun penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami sepenuhnya dampak ekosistem dan mengoptimalkan penggunaannya dalam strategi pengelolaan hama terpadu (Jyoti, 2024; Dang et al., 2012).

Adaptasi Ekosistem terhadap Intervensi yang Berasal dari Tumbuhan

Intervensi yang berasal dari tumbuhan memicu adaptasi ekosistem jangka panjang melalui interaksi spesies-lingkungan yang kompleks. Perubahan luas daun spesifik (SLA) menunjukkan strategi tanaman untuk perolehan sumber daya dan adaptasi lingkungan (Liu et al., 2022), yang mempengaruhi struktur dan fungsi ekosistem. Respons jangka panjang mencakup perubahan komposisi spesies, perubahan produktivitas, dan perubahan jasa ekosistem. Kerugian jangka pendek akibat intervensi tanaman dapat diimbangi dengan peningkatan keanekaragaman hayati dan kesehatan ekosistem dalam jangka panjang (Sun dkk. 2012). Penting untuk mempertimbangkan dampak langsung dan jangka panjang ketika mengevaluasi respons ekosistem. Hormesis lingkungan menunjukkan bahwa stresor ringan dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stresor yang lebih kuat (Erofeeva , 2021). Memahami adaptasi multilevel ini sangat penting untuk memprediksi dinamika ekosistem dan menginformasikan strategi pengelolaan, meskipun beberapa proses rumit dan lambat, sehingga memerlukan penelitian dan pemantauan berkelanjutan (Maček dkk., 2016).

Pestisida Botani sebagai Tekanan Selektif

Pestisida nabati dapat berfungsi sebagai mekanisme tekanan selektif dalam pertanian, memberikan pengelolaan hama yang ditargetkan dibandingkan dengan pestisida sintetik. Senyawa yang berasal dari tumbuhan ini memiliki cara kerja spesifik yang mempengaruhi hama sekaligus meminimalkan bahaya bagi organisme menguntungkan (Dao et al., 2021). Mekanismenya yang beragam dapat menargetkan fisiologi serangga, termasuk sistem saraf, sehingga mengakibatkan hilangnya koordinasi, kelumpuhan, dan kematian (Gupta dkk. 2024). Kekhususan ini memungkinkan pengendalian hama yang tepat sekaligus menjaga musuh alami dan penyerbuk (Ndakidemi et al., 2016; Samanta et al., 2023). Ekstrak biji mimba menunjukkan efektivitas dibandingkan emamektin benzoat sintetik dalam mengendalikan hama lepidopteran pada tomat, sekaligus terbukti lebih hemat biaya (Akhter et al., 2023). Carlina oksida yang diisolasi dari akar *Carlina acaulis* menunjukkan toksisitas selektif terhadap tungau laba-laba *Tetranychus urticae* tanpa merugikan predator alaminya *Neoseiulus californicus* (Rizzo et al., 2023). Meskipun tidak terlalu berbahaya bagi organisme non-target, pestisida nabati dapat berdampak buruk pada serangga menguntungkan jika digunakan secara tidak tepat (Ndakidemi et al., 2016; Samanta et al., 2023). Hal ini dapat mengakibatkan resistensi hama dan wabah sekunder. Oleh karena itu, penggunaannya harus dioptimalkan dalam program pengelolaan hama terpadu, dengan dosis yang tepat dan penerapan selektif, untuk menjaga keseimbangan ekologi (Gupta et al., 2024; Ndakidemi et al., 2016).

Manajemen Konvergensi Dan Presisi Bioteknologi Bioteknologi dalam Optimalisasi Pestisida Nabati

Teknik bioteknologi, seperti rekayasa genetika, CRISPR-Cas9, dan interferensi RNA, mengoptimalkan pestisida nabati dengan meningkatkan produksi senyawa pestisida, memodifikasi tanaman untuk mengekspresikan protein insektisida, dan secara khusus menargetkan hama sambil menghindari organisme non-target (Sharma dkk., 2024). Minyak atsiri tumbuhan berfungsi sebagai biopestisida berspektrum luas dan toksisitas rendah, dan bioteknologi menyempurnakan ekstraksi, formulasi, dan penyampaiannya, dengan nanoteknologi meningkatkan stabilitas dan kemanjuran minyak atsiri yang dienkapsulasi nano (Mwamburi, 2022; Villarreal dkk., 2023). Isolasi terarah bioassay, karakterisasi kimia, kimia kombinatorial, dan penyaringan throughput tinggi mempercepat penemuan, optimalisasi, dan produksi pestisida nabati baru dan turunan sintetiknya (Gonzalez-Coloma et al., 2010). Metode-metode ini meningkatkan kemanjuran, spesifisitas, dan keamanan lingkungan dari pestisida nabati, mengatasi keterbatasan biopestisida tradisional sekaligus mempertahankan manfaat ramah lingkungan (Bilgrami & Khan, 2022; Wend et al., 2024).

Teknologi Pengiriman Inovatif untuk Pestisida Botani

Teknologi penyampaian yang inovatif telah meningkatkan efektivitas pestisida nabati, sehingga mengatasi tantangan dalam pertanian dan pengelolaan hama. Mikroenkapsulasi meningkatkan formulasi bahan aktif minyak atsiri tanaman, memungkinkan pengembangan produk baru (Paluch et al., 2011). Metode ini mengatasi masalah stabilitas dan keterbatasan lain yang menghambat penggunaan pestisida nabati dalam skala besar (Dao et al., 2021). Nanoenkapsulasi memastikan pengiriman pestisida yang tepat ke jaringan tanaman, meningkatkan efektivitas, dan mengurangi penggunaan bahan kimia (Mmbando, 2024). Integrasi nanoteknologi dengan pestisida nabati telah mengarah pada pengembangan formulasi efisien yang mengatasi degradasi, ketidakstabilan, dan volatilisasi (Oliveira et al., 2018). Penggabungan ini mewakili pendekatan pertanian berkelanjutan, mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan meminimalkan dampak lingkungan. Pada akhirnya, teknologi seperti mikroenkapsulasi, enkapsulasi nano, dan metode berbasis nanoteknologi lainnya sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pestisida nabati dan meningkatkan stabilitas, ketepatan pengiriman, dan kemanjuran secara keseluruhan. Penelitian yang sedang berlangsung di bidang ini menjanjikan solusi pengelolaan hama yang lebih berkelanjutan dan efektif untuk pertanian.

Pertanian Presisi dalam Pengendalian Hama Botani

Pertanian presisi (PA) mengintegrasikan pengelolaan hama botani tingkat lanjut untuk perlindungan tanaman berkelanjutan, memanfaatkan kemampuan teknologi PA dengan metode pengendalian hama ramah lingkungan untuk pengelolaan hama yang ditargetkan. Teknologi seperti GPS, penginderaan jarak jauh, dan analisis data meningkatkan strategi hama botani (Balaji et al., 2024; Tangkesalu et al., 2023). Drone dengan sensor multispektral mendeteksi serangan hama atau stres tanaman secara dini, sehingga memungkinkan penerapan pestisida nabati secara tepat waktu (Aldosari, 2024; Gundreddy dkk., 2024). Ketepatan ini mengurangi penggunaan pestisida, meminimalkan dampak lingkungan, dan mendukung keberlanjutan (Kayastha et al., 2024; Sharma, 2023). AI dan pembelajaran mesin menganalisis kumpulan data yang kompleks, termasuk data tanah, cuaca, dan hama, untuk mengoptimalkan strategi pengendalian hama (Aldosari, 2024; Divyajyothi et al., 2024). Teknologi ini memprediksi wabah hama dan menyesuaikan intervensi pestisida nabati. Mengintegrasikan strategi hama

botani tingkat lanjut dengan PA menawarkan perlindungan tanaman yang berkelanjutan, menggabungkan presisi dengan manfaat ekologis untuk pengelolaan yang efektif dan mengurangi dampak lingkungan (Khan, 2024; Khokhar et al., 2024). Tantangan seperti akses teknologi dan pelatihan petani harus diatasi agar dapat diadopsi secara luas (Anand et al., 2023; Sharma, 2023).

Strategi Pembangunan Berkelanjutan Dan Transformatif

Tujuan Pengelolaan Hama Botani dan Keberlanjutan

Pengelolaan hama tumbuhan mendukung keberlanjutan global dengan menyediakan alternatif ramah lingkungan dibandingkan pestisida konvensional, sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) PBB mengenai ketahanan pangan, perlindungan lingkungan, dan produksi berkelanjutan. Pestisida nabati dalam penyimpanan biji-bijian menawarkan pengendalian hama berkelanjutan dengan toksisitas non-target yang rendah dan kompatibel dengan pengelolaan hama terpadu (Jyoti, 2024), serta mendorong Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab (SDG 12). Strategi pengelolaan hama berbasis biologis, termasuk mekanisme pertahanan tanaman, meningkatkan program pengelolaan hama terpadu yang berkelanjutan (Chidawanyika et al., 2012), berkontribusi terhadap SDG 2 (Zero Hunger) dengan memastikan ketahanan pangan dan mengurangi dampak lingkungan. Kebun raya, seperti Kebun Raya Universitas British Columbia, memajukan pengelolaan hama berkelanjutan dan berkontribusi pada 12 dari 17 SDG melalui konservasi tanaman ex situ, pendidikan keberlanjutan, dan keterlibatan masyarakat (Lopez-Villalobos et al., 2022). Lembaga-lembaga ini berfungsi sebagai pusat penelitian dan pendidikan yang penting untuk pengelolaan hama berkelanjutan, penting untuk mencapai SDGs dan memastikan keberlanjutan ekologi dan ekonomi jangka panjang di bidang pertanian, terutama karena perubahan iklim mempengaruhi dinamika hama.

Penilaian Ekonomi Pengelolaan Hama Ekologis

Model ekonomi yang menilai layanan pengelolaan hama ekologis mencerminkan dinamika kompleks ekosistem pertanian dan kekuatan pasar. Model mikroekonomi memperkirakan nilai kekayaan spesies musuh alami untuk pengendalian hama biologis dengan menganalisis hasil pasar yang dipengaruhi oleh perubahan hasil panen, pergeseran pasokan, dan elastisitas harga (Letourneau et al., 2015). Model optimasi bioekonomi dinamis mengintegrasikan dinamika hama dan predator, pertumbuhan tanaman, fungsi kerusakan hasil, dan keputusan manajerial untuk menentukan penggunaan insektisida yang optimal sambil mempertimbangkan pengendalian hama alami (Zhang & Swinton, 2009). Kekuatan pasar dan pengganti teknologi dapat secara signifikan mempengaruhi penilaian jasa ekosistem dari waktu ke waktu, bahkan dengan fungsi ekosistem yang konstan. Misalnya, nilai pengendalian hama yang diberikan oleh kelelawar ekor bebas Meksiko menurun sebesar 79% selama 18 tahun karena adopsi kapas Bt, turunnya harga kapas, dan berkurangnya areal kapas (López-Hoffman et al., 2014). Model ekonomi yang efektif harus mengintegrasikan proses ekologi, dinamika pasar, dan keputusan pengelolaan. Model surplus ekonomi (Zhang et al., 2018), pendekatan transfer manfaat (Wiederholt et al., 2016), dan model berbasis pakar (Riggi et al., 2024) juga telah digunakan. Namun, tantangan dalam menangkap kompleksitas sistem ini memerlukan kolaborasi interdisipliner lebih lanjut untuk metode penilaian yang lebih komprehensif (Naranjo et al., 2015).

Dukungan Kebijakan untuk Pengendalian Hama Botani

Kerangka kebijakan sangat penting untuk memajukan teknologi pengendalian hama botani yang inovatif dalam Pengelolaan Hama Terpadu (IPM) dan pertanian berkelanjutan.

Kebijakan pengelolaan hama yang mendukung sangat penting untuk mempromosikan PHT dan alternatif botani (Munyua, 2006). Dukungan pemerintah sangat penting untuk penerapan pengelolaan hama alternatif secara luas. Kerangka kebijakan dapat mengatasi permasalahan seperti kompleksitas formulasi, keterbatasan data bahan kimia, dan hambatan peraturan yang menghambat penggunaan pestisida nabati dalam penyimpanan biji-bijian (Jyoti, 2024). Meskipun terdapat manfaat seperti tingkat toksisitas yang rendah terhadap organisme non-target dan kompatibilitas PHT, teknologi pengendalian hama botani menghadapi hambatan sosial dan psikologis dalam penerapannya (Jyoti, 2024; Munyua, 2006). Oleh karena itu, kebijakan harus mendorong inovasi teknologi dan memperhatikan aspek adopsi sosial. Kebijakan yang efektif harus menekankan dukungan peraturan, pelatihan, dan penelitian kolaboratif untuk mengatasi tantangan pengendalian hama botani (Jyoti, 2024; Quiroz et al., 2019). Mengintegrasikan solusi ini ke dalam praktik penyimpanan dan pertanian dapat meningkatkan ketahanan pangan dan mengurangi risiko pestisida sintesis. Selain itu, kebijakan harus mendorong pendekatan partisipatif dan pertukaran pengetahuan antar pemangku kepentingan untuk memfasilitasi perubahan dalam praktik pengelolaan hama (Munyua, 2006; Zhou et al., 2024).

Decoding Molekuler Lanjutan Dari Mekanisme Pertahanan Tanaman Metabolit Sekunder dalam Pertahanan Kimia

Metabolit sekunder tanaman sangat penting untuk pertahanan kimia terhadap tekanan biotik dan abiotik (Dhruv et al., 2022). Senyawa ini bertahan melawan patogen dan herbivora serta memainkan peran penting dalam interaksi ekologi tanaman (Gani et al., 2020). Mereka memungkinkan tanaman dengan cepat mendeteksi dan merespons serangan herbivora dalam kondisi yang berubah (Divekar et al., 2022). Metabolit sekunder secara langsung meracuni serangga hama, memicu antixenosis, dan secara tidak langsung melindungi tanaman dengan merekrut musuh herbivora (Divekar et al. 2022). Bukti terbaru menunjukkan bahwa beberapa metabolit sekunder juga mengatur respons imun, seperti pengendapan kalose dan kematian sel terprogram, selain berfungsi sebagai antibiotik (Piasecka et al., 2015). Secara keseluruhan, metabolit sekunder tanaman bekerja melalui berbagai jalur, termasuk toksisitas langsung, anti-xenosis, perlindungan tidak langsung, dan regulasi kekebalan tubuh. Sifatnya yang beragam dan kemampuannya untuk terakumulasi di berbagai jaringan pada tahap pertumbuhan yang berbeda menjadikannya penting untuk pertahanan tanaman (Dhruv et al., 2022; Divekar et al., 2022).

Interaksi Molekuler dalam Gangguan Hama

Pengendalian hama selektif memanfaatkan interaksi neuropeptida-reseptor, gangguan endokrin, dan pengenalan molekuler berbasis muatan untuk mengganggu proses penting serangga (Nachman et al., 1993; Tebourbi et al., 2011; Gelmi et al., 2012). Mimetik peptida yang dirancang sebagai agonis atau antagonis dapat mengganggu kelangsungan hidup hama, sedangkan pestisida yang bertindak sebagai pengganggu endokrin mempengaruhi sekresi hormon atau pengikatan reseptor, sehingga berdampak pada reproduksi dan perkembangan (Nachman et al., 1993; Tebourbi et al., 2011). Pestisida juga dapat mengganggu proses biokimia atau menghasilkan spesies oksigen reaktif sehingga menyebabkan toksisitas (Tebourbi et al., 2011). Thiabendazole (TBZ) merupakan contoh penargetan selektif dengan mengganggu isotipe β -tubulin manusia tertentu (TUBB8), yang memengaruhi mikrotubulus sel endotel dan angiogenesis (Garge et al., 2020). Memahami mekanisme molekuler aksi pestisida sangat penting untuk mengembangkan strategi pengendalian hama yang selektif dan berkelanjutan sekaligus meminimalkan efek yang tidak diinginkan pada organisme non-target (Garge et al., 2020).

Wawasan Etnobotani dalam Pengelolaan Hama

Pengetahuan etnobotani dapat mengungkap strategi pengelolaan hama yang tersembunyi, seperti yang ditunjukkan oleh beberapa penelitian. Masyarakat adat telah melestarikan praktik pengendalian hama yang efektif, ramah lingkungan, dan hemat biaya dengan menggunakan bahan tanaman lokal dan produk sampingan hewan. Petugas penyuluhan pertanian modern sering mengabaikan alternatif ramah lingkungan dibandingkan pestisida kimia. Di Kabupaten Malang sebuah penelitian menemukan bahwa 71% petugas penyuluhan mengandalkan metode kimia, dan hanya 3,2% yang menyadari pengendalian biologis menggunakan musuh alami (Hidayati, 2022). Para petani di Kabupaten Malang secara tradisional menggunakan daun Jati dan Pisang untuk melindungi biji-bijian yang disimpan dari hama. Penelitian telah mengkonfirmasi kemanjuran ekstrak daun jati dan pisang terhadap beberapa hama penyimpanan, menyoroti dasar ilmiah dari praktik tradisional ini (Permata, 2022). Kesenjangan antara praktik tradisional dan modern ini menyoroti potensi pengetahuan etnobotani untuk mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) untuk pertanian berkelanjutan dan konservasi lingkungan. Untuk memanfaatkan potensi ini, diperlukan dokumentasi, validasi, dan integrasi yang lebih baik antara pengetahuan tradisional dengan sains modern.

KESIMPULAN

Pengelolaan hama botani mewakili pendekatan komprehensif terhadap pertanian berkelanjutan yang mengintegrasikan mekanisme pertahanan tanaman secara biokimia, molekuler, dan ekologi. Pemanfaatan senyawa yang berasal dari tumbuhan dengan interaksi molekuler spesifik dan cara kerja yang ditargetkan memberikan alternatif yang ramah lingkungan terhadap pestisida sintetik. Pendekatan ini memanfaatkan mekanisme pertahanan tanaman yang kompleks, inovasi bioteknologi, dan strategi intervensi yang tepat untuk mengganggu proses fisiologis hama sekaligus meminimalkan gangguan ekologi. Metode-metode ini menunjukkan potensi yang signifikan untuk mengembangkan sistem pengelolaan hama yang lebih berkelanjutan dan seimbang secara ekologis yang selaras dengan tujuan keberlanjutan pertanian global.

RUJUKAN

- Akhter, W., Shah, F. M., Yang, M., Mkindi, A. G., Akram, H., Ali, A., Razaq, M., Freed, S., Mahmood, K., & Hanif, M. (2023). Botanical biopesticides have an influence on tomato quality through pest control and are cost-effective for farmers in developing countries. *PLOS ONE*, 18(11), e0294775. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294775>
- Rizzo, R., Ragusa, E., Spinozzi, E., Ferrati, M., Maggi, F., Benelli, G., Sinacori, M., Tsolakis, H., Zeni, V., Lo Verde, G., & Petrelli, R. (2023). Lethal and sublethal effects of carlina oxide on *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) and *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Pest Management Science*, 80(3), 967–977. <https://doi.org/10.1002/ps.7827>
- Abuqamar, S., Moustafa, K., & Tran, L. S. (2017). Mechanisms and strategies of plant defense against *Botrytis cinerea*. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(2), 262–274. <https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1271767>
- Ahmed, N., Saeed, M., Alam, M., Shahjeer, K., Ahmed, S., Awadh Al-Mutairi, K., Fathy Khater, H., Iqbal, T., Salman, M., Ullah, R., Abd Aleem Hassan Ahmed, N., & Ullah, H. (2022). Botanical Insecticides Are a Non-Toxic Alternative to Conventional Pesticides

- in the Control of Insects and Pests. *intechopen*.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.100416>
- Aldosari, H. M. (2024). An Expert Model Using Deep Learning for Image-based Pest Identification with the TSLM Approach for Enhancing Precision Farming. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 15(3), 160–183. <https://doi.org/10.58346/jowua.2024.i3.012>
- Anand, J., Yusoff, N., Ghani, H., & Thoti, K. (2023). Technological Applications in Smart Farming: A Bibliometric Analysis. *Advanced Sustainable Technologies (ASET)* 2(2). <https://doi.org/10.58915/aset.v2i2.334>
- Chidawanyika, F., Mudavanhu, P., Nyamukondiwa, C. (2012). Biologically Based Methods for Pest Management in Agriculture under Changing Climates: Challenges and Future Directions. *Insects*, 3(4), 1171–1189. <https://doi.org/10.3390/insects3041171>
- Arnason, J. T., & Bernards, M. A. (2010). Impact of constitutive plant natural products on herbivores and pathogens The present review is one of the special series of reviews on animal–plant interactions. *Canadian Journal of Zoology*, 88(7), 615–627. <https://doi.org/10.1139/z10-038>
- Balaji, B., Pampareddy, P., T, C., & Shudeer, S. (2024). Role of Entomology in the Era of Precision Agriculture: A Review. *Annual Research & Review in Biology*, 39(9), 122–129. <https://doi.org/10.9734/arrb/2024/v39i92126>
- Beringue, A., Queffelec, J., Le Lann, C., & Sulmon, C. (2024). Sublethal pesticide exposure in non-target terrestrial ecosystems: From known effects on individuals to potential consequences on trophic interactions and network functioning. *Environmental Research*, 260, 119620. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119620>
- Bilgrami, A. L., & Khan, A. (2022). Chapter 13 - Merits, demerits, risks, and restrictions of biopesticides. In *Plant Nematode Biopesticides* (pp. 207–215). *elsevier*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823006-0.00015-2>
- Blée, E. (2002). Impact of phyto-oxylipins in plant defence. *Trends in Plant Science*, 7(7), 315–322. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02290-2](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02290-2)
- Dao, H. T., Vu, D. H., Le Dang, Q., Dao, V. H., & Lam, T. D. (2021). APPLICATION OF BOTANICAL PESTICIDES IN ORGANIC AGRICULTURE PRODUCTION: POTENTIAL AND CHALLENGES. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 59(6). <https://doi.org/10.15625/2525-2518/59/6/16217>
- Dao, H. T., Vu, D. H., Le Dang, Q., Dao, V. H., & Lam, T. D. (2021). Application of botanical pesticides in organic agriculture production: potential and challenges. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 59(6). <https://doi.org/10.15625/2525-2518/59/6/16217>
- Dao, H. T., Vu, D. H., Le Dang, Q., Dao, V. H., & Lam, T. D. (2021). Application of botanical pesticides in organic agriculture production: potential and challenges. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 59(6). <https://doi.org/10.15625/2525-2518/59/6/16217>
- De La Cruz Quiroz, R., Rostro Alanis, M. D. J., Cruz Maldonado, J. J., Parra Saldívar, R., & Torres, J. A. (2019). Fungi-based biopesticides: shelf-life preservation technologies used in commercial products. *Journal of Pest Science*, 92(3), 1003–1015. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01117-5>
- De Oliveira, J. L., Campos, E. V. R., De Andrade, D. J., Vechia, J. F. D., Lima, R., Polanczyk, R. A., Do Nascimento, J., Germano-Costa, T., Fraceto, L. F., Soares, S. T., & Gonçalves, K. C. (2019). Association of zein nanoparticles with botanical compounds for effective pest control systems. *Pest Management Science*, 75(7), 1855–1865. <https://doi.org/10.1002/ps.5338>

- Dhruv, J., Dobaria, J., & Shukla, Y. (2022). Plant secondary metabolites in stress: An overview. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 35(2), 120–132. <https://doi.org/10.5958/0974-4479.2022.00018.1>
- Diehn, M., & Relman, D. A. (2001). Comparing functional genomic datasets: lessons from DNA microarray analyses of host–pathogen interactions. *Current Opinion in Microbiology*, 4(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/s1369-5274\(00\)00171-5](https://doi.org/10.1016/s1369-5274(00)00171-5)
- Ding, P., & Ding, Y. (2020). Stories of Salicylic Acid: A Plant Defence Hormone. *Trends in Plant Science*, 25(6), 549–565. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.01.004>
- Divekar, P. A., Ray, A., Rani, V., Singh, A. K., Singh, A. K., Gadratagi, B. G., Singh, R. P., Kumar, A., Singh, V., Meena, R. S., Behera, T. K., Kumar, R., Narayana, S., & Divekar, B. A. (2022). Plant Secondary Metabolites as Defence Tools against Herbivores for Sustainable Crop Protection. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(5), 2690. <https://doi.org/10.3390/ijms23052690>
- Divyajyothi, M. G., Jopate, R., Abdulrahim Abdulsalam Albalushi, R., & Abdullah Saleh Al Balushi, S. (2024). AI Precision for Irrigation, Crop Management, and Pest Control for Sustainable Agriculture in Oman. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1401(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1401/1/012005>
- Ellis, W. (2018). Plant knowledge: transfers, shaping and states in plant practices. *Anthropology Southern Africa*, 41(2), 80–91. <https://doi.org/10.1080/23323256.2018.1476165>
- Erofeeva, E. A. (2021). Environmental hormesis of non-specific and specific adaptive mechanisms in plants. *Science of The Total Environment*, 804, 150059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150059>
- Fürstenberg-Hägg, J., Bak, S., & Zagrobelny, M. (2013). Plant defence against insect herbivores. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 10242–10297. <https://doi.org/10.3390/ijms140510242>
- Gado, J., & Alviar, K. (2022). Quantitative Trait Locus Mapping of Host-plant Resistance against Insect Pests. *scienceopen*. <https://doi.org/10.14293/s2199-1006.1.sor.pprt98l.v1>
- Galanti, D., Galanti, D., Jung, J. H., Müller, C., & Bossdorf, O. (2024). Discarded sequencing reads uncover natural variation in pest resistance in *Thlaspi arvense*. *elife sciences*. <https://doi.org/10.7554/elife.95510>
- Gani, U., Vishwakarma, R. A., & Misra, P. (2020). Membrane transporters: the key drivers of transport of secondary metabolites in plants. *Plant Cell Reports*, 40(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00299-020-02599-9>
- Garge, R. K., Kachroo, A. H., Wallingford, J. B., Lee, C., Marcotte, E. M., Cha, H. J., & Gollihar, J. D. (2020). Antifungal benzimidazoles disrupt vasculature by targeting one of nine β -tubulins. *cold spring harbor laboratory*. <https://doi.org/10.1101/2020.09.15.298828>
- Gelmi, A., Wallace, G. G., & Higgins, M. J. (2012). Resolving Sub-Molecular Binding and Electrical Switching Mechanisms of Single Proteins at Electroactive Conducting Polymers. *Small*, 9(3), 393–401. <https://doi.org/10.1002/sml.201201686>
- Gonzalez-Coloma, A., Reina, M., Fraga, B. M., & Diaz, C. E. (2010). Natural Product-Based Biopesticides for Insect Control (Vol. 3, pp. 237–268). *elsevier*. <https://doi.org/10.1016/b978-008045382-8.00074-5>
- Paluch, G., Bessette, S., & Bradbury, R. (2011). Development of Botanical Pesticides for Public Health. *Journal of ASTM International*, 8(4), 1–7. <https://doi.org/10.1520/jai103468>
- Gundreddy, R. R., Reddy, B. T., M, S., E, V. M., Alekhya, G., Gaddam, N. R., Bv, J., & Darjee, S. (2024). Actuation Drones in Agriculture: Advancing Precision Pest Management

- through Biocontrol and Modern Techniques. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(9), 825–835. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i92879>
- Gupta, S., Gupta, R. K., Dash, P. P., & Mishra, A. (2024). Exploring the Efficacy and Sustainability of Natural Pesticides in Plant Protection. *Current Functional Foods*, 03. <https://doi.org/10.2174/0126668629301079240816072818>
- Wend, K., Zorrilla, L., Freimoser, F. M., & Gallet, A. (2024). Microbial pesticides – challenges and future perspectives for testing and safety assessment with respect to human health. *Environmental Health*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12940-024-01090-2>
- Horn, D. J. (2019). Temperature Synergism in Integrated Pest Management (pp. 125–140). *crc*. <https://doi.org/10.1201/9780429308581-5>
- Hebbalkar, D. S., Hebbalkar, G. D., Sharma, R. N., Joshi, V. S., & Bhat, V. S. (1992). Mosquito repellent activity of oils from *Vitex negundo* Linn. leaves. *The Indian Journal of Medical Research*, 95, 200-203.
- Huot, O. B., Tamborindeguy, C., & Nachappa, P. (2013). The evolutionary strategies of plant defences have a dynamic impact on the adaptations and interactions of vectors and pathogens. *Insect Science*, 20(3), 297–306. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12010>
- Ibrahim, K. M., Symondson, W. O. C., & Liddell, J. E. (1997). The Ecology of Agricultural Pests: Biochemical Approaches. *The Journal of Applied Ecology*, 34(2), 545. <https://doi.org/10.2307/2404902>
- Jirschitzka, J., Mattern, D. J., Gershenzon, J., & D'Auria, J. C. (2012). Learning from nature: new approaches to the metabolic engineering of plant defence pathways. *Current Opinion in Biotechnology*, 24(2), 320–328. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.10.014>
- Jyoti . (2024). Effect of Plant Based Pesticides in Grain Storage Management. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(4). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i04.24964>
- Jyoti U. (2024). Effect of Plant Based Pesticides in Grain Storage Management. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(4). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i04.24964>
- Karasov, T. L., Horton, M. W., & Bergelson, J. (2014). Genomic variability as a driver of plant–pathogen coevolution? *Current Opinion in Plant Biology*, 18, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.12.003>
- Kayastha, S., Sahoo, J. P., Behera, A., & Mahapatra, M. (2024). Growing Green: Sustainable Agriculture Meets Precision Farming: A Review. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika, Of*. <https://doi.org/10.18805/bkap697>
- Khan, N. (2024). Unlocking Innovation in Crop Resilience and Productivity: Breakthroughs in Biotechnology and Sustainable Farming. *Innovation Discovery*, 1(4), 28. <https://doi.org/10.53964/id.2024028>
- Khokhar, H., Kumar, C., & Kaushik, N. (2024). Safeguarding Tomato Cultivation: Challenges and Integrated Pest Management Strategies in North India. *BIO Web of Conferences*, 110, 01009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411001009>
- Letourneau, D. K., Ando, A. W., Jedlicka, J. A., Narwani, A., & Barbier, E. (2015). Simple-but-sound methods for estimating the value of changes in biodiversity for biological pest control in agriculture. *Ecological Economics*, 120(120), 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.015>
- Liu, Z., Liu, C., Ren, T., He, N., Zhao, M., & Zhang, H. (2022). Divergent response and adaptation of specific leaf area to environmental change at different spatio-temporal scales jointly improve plant survival. *Global Change Biology*, 29(4), 1144–1159. <https://doi.org/10.1111/gcb.16518>

- López-Hoffman, L., Medellín, R. A., Bagstad, K. J., Russell, A., Sansone, C., Diffendorfer, J. E., Cryan, P., Lasharr, K., Wiederholt, R., Mccracken, G., Goldstein, J., Semmens, D., Loomis, J., & Srygley, R. B. (2014). Market Forces and Technological Substitutes Cause Fluctuations in the Value of Bat Pest-Control Services for Cotton. *PLoS ONE*, 9(2), e87912. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087912>
- Lopez-Villalobos, A., Lewis, P., Kubeck, K., Bunsha, D., Hill, A., Douglas, J., Caddy, L., Stormes, B., Sugiyama, R., Austin, D., & Moreau, T. (2022). Aligning to the UN Sustainable Development Goals: Assessing Contributions of UBC Botanical Garden. *Sustainability*, 14(10), 6275. <https://doi.org/10.3390/su14106275>
- Luiz De Oliveira, J., Ramos Campos, E. V., & Fraceto, L. F. (2018). Recent Developments and Challenges for Nanoscale Formulation of Botanical Pesticides for Use in Sustainable Agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(34), 8898–8913. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03183>
- Maček, I., Pfanz, H., Vodnik, D., Dumbrell, A. J., & Low-Décarie, E. (2016). Locally Extreme Environments as Natural Long-Term Experiments in Ecology (Vol. 55, pp. 283–323). *elsevier*. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2016.08.001>
- Meena, N., Kanojia, Y., Meena, R., Roat, B., & Dangi, N. (2021). Indigenous approaches of pest management in vegetables with special reference to coriander in southern Rajasthan, India. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 20(4). <https://doi.org/10.56042/ijtk.v20i4.42765>