

Potential of Plant Secondary Metabolites as Organic Biopesticides for Sustainable Agriculture

Pemanfaatan Metabolit Sekunder Tumbuhan sebagai Biopestisida Organik dalam Pertanian Berkelanjutan

Muhammad Furqan^{1*}, Mhd. Taufiq Hadi Wijaya²

¹Dosen Sains Pertanian FAPERTA Universitas Islam Kebangsaan Indonesia

²Dosen Prodi Peternakan FAPERTA Universitas Islam Kebangsaan Indonesia
Bireuen, Indonesia

*E-mail korespondensi: furqamuhammad08@gmail.com

Abstract

Sustainable agriculture requires effective and environmentally friendly pest management strategies to minimize the adverse impacts associated with the excessive use of synthetic pesticides. One promising alternative is the application of organic biopesticides derived from plant secondary metabolites. This article aims to examine the potential of plant secondary metabolites as active ingredients in organic biopesticides to support sustainable agricultural practices. The study employed a literature review approach by collecting and synthesizing relevant scientific publications, including reputable national and international journal articles, books, conference proceedings, and other scholarly sources. The findings indicate that major groups of secondary metabolites, including alkaloids, terpenoids, flavonoids, tannins, and saponins, exhibit diverse biological activities as insecticides, fungicides, bactericides, repellents, antifeedants, insect growth regulators, and reproductive inhibitors of plant pests. Compared with synthetic pesticides, biopesticides based on plant secondary metabolites offer several advantages, including high biodegradability, lower residue levels, reduced toxicity to non-target organisms, and compatibility with Integrated Pest Management (IPM) programs. Although challenges remain, such as variations in the concentration of active compounds, limited stability, and constraints in commercial formulation, advances in extraction techniques, nanoencapsulation, metabolomics, and metabolic engineering provide promising opportunities to improve the efficacy and stability of these biopesticides. Therefore, plant secondary metabolites represent a highly promising source of active compounds for the development of organic biopesticides, contributing to productive, environmentally friendly, and sustainable agricultural systems.

Keywords: *plant secondary metabolites; organic biopesticides; botanical pesticides; sustainable agriculture; integrated pest management.*

Abstrak

Pertanian berkelanjutan memerlukan teknologi pengendalian organisme pengganggu tanaman yang efektif sekaligus ramah lingkungan untuk mengurangi dampak negatif penggunaan pestisida sintesis. Salah satu alternatif yang berpotensi dikembangkan adalah biopestisida organik berbasis metabolit sekunder tumbuhan. Artikel ini bertujuan mengkaji potensi metabolit sekunder tumbuhan sebagai bahan aktif biopestisida organik dalam mendukung penerapan pertanian berkelanjutan. Penelitian menggunakan metode literature

review dengan mengumpulkan dan mensintesis berbagai sumber ilmiah yang relevan, meliputi jurnal nasional dan internasional bereputasi, buku ilmiah, prosiding, serta publikasi ilmiah lainnya. Hasil kajian menunjukkan bahwa berbagai kelompok metabolit sekunder, seperti alkaloid, terpenoid, flavonoid, tanin, dan saponin, memiliki aktivitas biologis sebagai insektisida, fungisida, bakterisida, repelan, antifeedant, pengatur pertumbuhan serangga, serta penghambat reproduksi organisme pengganggu tanaman. Pemanfaatan senyawa-senyawa tersebut memberikan berbagai keuntungan dibandingkan pestisida sintetis, antara lain mudah terdegradasi di lingkungan, memiliki risiko residu yang lebih rendah, relatif aman terhadap organisme non-target, serta mendukung penerapan Pengendalian Hama Terpadu (PHT). Meskipun masih menghadapi tantangan berupa variasi kandungan senyawa aktif, rendahnya stabilitas, dan keterbatasan formulasi komersial, perkembangan teknologi ekstraksi, nanoenkapsulasi, metabolomik, dan rekayasa metabolik membuka peluang besar bagi pengembangan biopestisida yang lebih efektif dan stabil. Dengan demikian, metabolit sekunder tumbuhan memiliki prospek yang sangat baik sebagai sumber bahan aktif biopestisida organik untuk mendukung sistem pertanian yang produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Kata kunci : metabolit sekunder; biopestisida organik; pestisida nabati; pertanian berkelanjutan; pengendalian hama terpadu.

PENDAHULUAN

Pertanian berkelanjutan merupakan pendekatan dalam sistem budidaya yang mengintegrasikan pemanfaatan teknologi dan pengelolaan sumber daya alam secara bijaksana untuk mempertahankan produktivitas pertanian dalam jangka panjang tanpa menurunkan kualitas lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya berorientasi pada pemenuhan kebutuhan pangan masyarakat saat ini, tetapi juga menjamin ketersediaan sumber daya alam, seperti tanah, air, dan keanekaragaman hayati, bagi generasi mendatang. Oleh karena itu, pengembangan sistem pertanian modern diarahkan tidak hanya pada peningkatan hasil produksi, tetapi juga pada upaya meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, termasuk pencemaran tanah dan air, degradasi kesuburan lahan, serta gangguan terhadap organisme non-target (Fenibo & Matambo, 2021).

Salah satu inovasi yang mendukung implementasi pertanian berkelanjutan adalah pemanfaatan biopestisida organik sebagai alternatif pengendalian organisme pengganggu tanaman. Biopestisida merupakan agen pengendali hayati yang berasal dari organisme hidup maupun senyawa alami, seperti bakteri, jamur, virus, ekstrak tumbuhan, dan metabolit hasil biosintesis organisme tertentu. Dibandingkan dengan pestisida sintetis, biopestisida memiliki keunggulan berupa kemampuan terdegradasi secara alami, tingkat toksisitas yang relatif rendah terhadap manusia dan organisme non-target, serta risiko residu yang lebih kecil sehingga lebih mendukung keberlanjutan ekosistem pertanian (Assefa *et.al.*, 2026).

Pemanfaatan biopestisida juga sejalan dengan prinsip penggunaan sumber daya terbarukan dalam sistem pertanian berkelanjutan. Bahan bakunya dapat diperoleh dari berbagai sumber daya hayati yang tersedia secara alami sehingga mampu mengurangi ketergantungan petani terhadap pestisida berbahan kimia sintetis (Thakur *et.al.*, 2024). Selain itu, biopestisida merupakan komponen penting dalam penerapan *Integrated Pest Management* (IPM) atau Pengendalian Hama Terpadu yang mengombinasikan berbagai teknik pengendalian ramah lingkungan untuk menjaga produktivitas tanaman secara optimal. Keragaman mekanisme kerja yang dimiliki biopestisida juga berperan dalam menekan munculnya resistensi hama yang sering terjadi akibat penggunaan pestisida kimia secara terus-menerus (Fenibo & Matambo, 2022).

Penerapan biopestisida organik memberikan manfaat yang luas, tidak hanya dari aspek lingkungan, tetapi juga dari sisi ekonomi dan sosial. Pengurangan penggunaan pestisida sintesis dapat menurunkan biaya lingkungan dalam jangka panjang, meningkatkan keamanan pangan melalui berkurangnya residu bahan kimia pada produk pertanian, serta mendukung meningkatnya permintaan pasar terhadap produk pertanian organik dan ramah lingkungan (Hubbard *et.al.*, 2014). Dengan demikian, biopestisida organik menjadi salah satu inovasi strategis dalam mendukung terwujudnya sistem pertanian yang produktif, berdaya saing, dan berkelanjutan (Fenibo & Matambo, 2021).

Tumbuhan memiliki kemampuan alami untuk menghasilkan berbagai senyawa bioaktif yang dikenal sebagai metabolit sekunder sebagai bagian dari mekanisme adaptasi dan pertahanannya terhadap tekanan biotik maupun abiotik. Berbeda dengan metabolit primer yang berfungsi dalam proses fisiologis dasar seperti pertumbuhan dan perkembangan, metabolit sekunder berperan sebagai sistem pertahanan kimia terhadap serangan organisme pengganggu. Kelompok senyawa ini meliputi alkaloid, flavonoid, terpenoid, saponin, tanin, dan senyawa fenolik yang terdistribusi pada berbagai organ tanaman, termasuk daun, batang, akar, bunga, dan biji. Sintesis metabolit sekunder umumnya meningkat ketika tanaman menghadapi kondisi stres akibat serangan hama, patogen, maupun perubahan lingkungan, sehingga senyawa tersebut berperan penting dalam meningkatkan kemampuan tanaman untuk bertahan hidup (Yang *et.al.*, 2024; Sharma *et.al.*, 2023).

Berbagai metabolit sekunder menunjukkan aktivitas biologis yang beragam dalam melindungi tanaman dari serangan serangga, mikroorganisme patogen, maupun herbivora. Sebagian senyawa bekerja sebagai repelen yang menghambat kedatangan hama, sedangkan senyawa lainnya bersifat toksik sehingga mampu mengganggu pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi organisme pengganggu. Terpenoid dan alkaloid diketahui dapat memengaruhi sistem saraf serangga, sementara flavonoid dan senyawa fenolik memiliki aktivitas antimikroba yang efektif dalam menghambat pertumbuhan berbagai patogen tanaman. Selain itu, sejumlah metabolit sekunder juga berfungsi sebagai antifeedant yang menurunkan aktivitas makan serangga sehingga tingkat kerusakan tanaman dapat ditekan. Keragaman mekanisme tersebut menjadikan metabolit sekunder sebagai komponen utama dalam sistem pertahanan alami tumbuhan (Koul, 2024; Isman, 2023).

Perkembangan penelitian dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan meningkatnya perhatian terhadap pemanfaatan metabolit sekunder tumbuhan sebagai bahan aktif biopestisida organik. Berbagai hasil penelitian melaporkan bahwa ekstrak tumbuhan yang mengandung metabolit sekunder mampu mengendalikan berbagai hama dan penyakit tanaman secara efektif dengan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan pestisida sintesis. Selain mudah mengalami biodegradasi, senyawa-senyawa tersebut memiliki risiko residu yang relatif kecil serta lebih aman bagi organisme non-target dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, metabolit sekunder tumbuhan dipandang sebagai sumber senyawa bioaktif yang sangat prospektif dalam

pengembangan biopestisida organik guna mendukung sistem pertanian yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan berorientasi pada ketahanan pangan (Marrone, 2024; Raveau *et.al.*, 2025).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode *literature review* atau kajian pustaka untuk menghimpun, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai informasi ilmiah mengenai metabolit sekunder tumbuhan, pestisida nabati, biopestisida organik, serta penerapannya dalam sistem pertanian berkelanjutan. Data sekunder diperoleh dari berbagai sumber ilmiah yang kredibel, meliputi artikel jurnal nasional dan internasional bereputasi, buku ilmiah, prosiding, serta publikasi lain yang relevan dengan topik penelitian.

Tahapan kajian diawali dengan penentuan fokus pembahasan dan penyusunan kata kunci pencarian yang sesuai dengan tujuan penelitian. Selanjutnya dilakukan penelusuran dan seleksi literatur berdasarkan tingkat relevansi, kualitas, dan keterbaruan sumber. Literatur yang telah terpilih kemudian dianalisis secara kritis, dibandingkan antarpelitian, dan disintesis untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai peran metabolit sekunder tumbuhan sebagai bahan aktif biopestisida organik dalam mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Hasil sintesis tersebut selanjutnya disusun secara sistematis sebagai dasar pembahasan dalam artikel ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

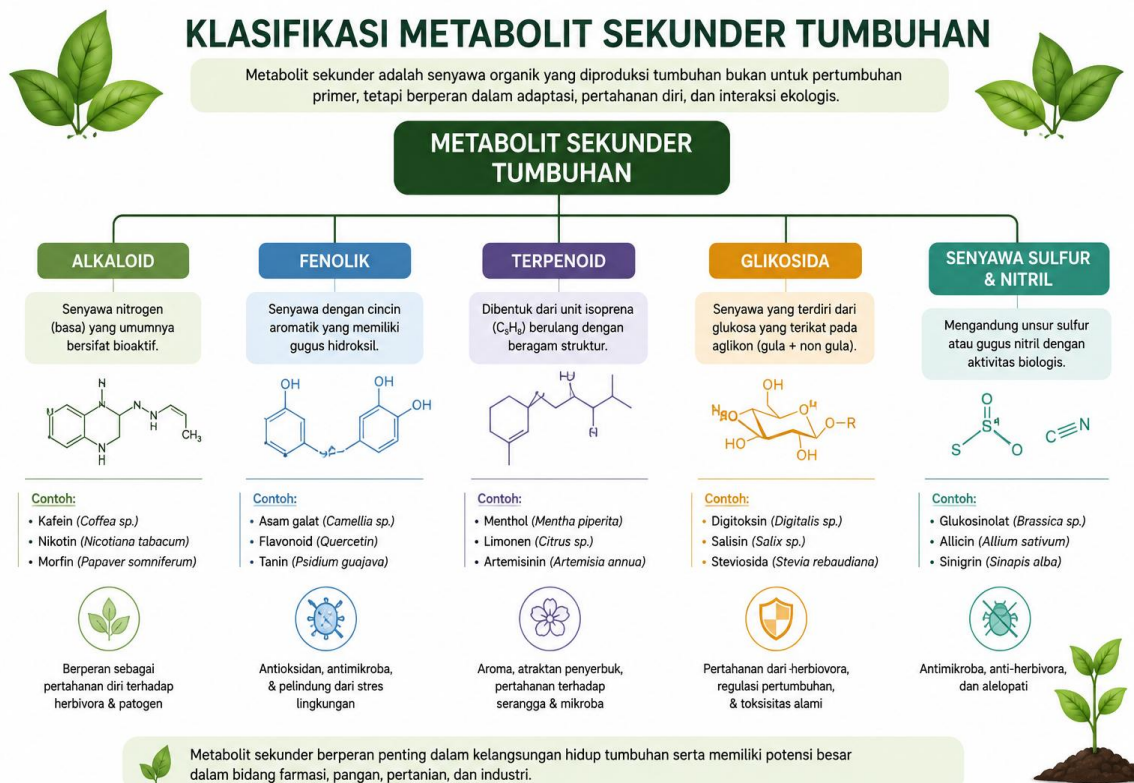
Metabolit Sekunder Tumbuhan

Metabolit sekunder merupakan kelompok senyawa organik yang diproduksi oleh tumbuhan dan tidak terlibat secara langsung dalam proses metabolisme primer yang berkaitan dengan pertumbuhan maupun perkembangan tanaman. Meskipun demikian, senyawa ini memiliki peranan ekologis yang sangat penting dalam meningkatkan kemampuan adaptasi dan mempertahankan kelangsungan hidup tumbuhan di lingkungan. Metabolit sekunder berfungsi sebagai bagian dari sistem pertahanan alami terhadap berbagai organisme pengganggu, seperti serangga, patogen, dan herbivora, serta membantu tanaman beradaptasi terhadap berbagai tekanan abiotik, termasuk kekeringan, suhu ekstrem, dan paparan radiasi ultraviolet (Yang *et.al.*, 2024).

Berdasarkan struktur kimia dan jalur biosintesisnya, metabolit sekunder tumbuhan dikelompokkan ke dalam beberapa golongan utama, antara lain terpenoid, alkaloid, flavonoid, senyawa fenolik, glikosida, dan saponin. Masing-masing kelompok memiliki aktivitas biologis yang berbeda dan berkontribusi dalam mekanisme pertahanan tanaman. Sebagian senyawa berperan sebagai repelen yang mengurangi ketertarikan serangga terhadap tanaman, sedangkan senyawa lainnya bekerja sebagai antifeedant yang menekan aktivitas makan hama. Selain itu, berbagai metabolit sekunder juga menunjukkan sifat toksik terhadap organisme pengganggu sehingga mampu menghambat pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi serangga. Tidak sedikit pula senyawa yang memiliki aktivitas antimikroba sehingga efektif dalam menghambat pertumbuhan jamur maupun bakteri penyebab penyakit tanaman (Sharma *et.al.*, 2023).

Meningkatnya perhatian terhadap dampak lingkungan dan kesehatan akibat penggunaan pestisida sintetis telah mendorong pengembangan metabolit sekunder

tumbuhan sebagai sumber bahan aktif biopestisida organik. Senyawa-senyawa alami tersebut memiliki karakteristik yang menguntungkan, seperti mudah mengalami biodegradasi, menghasilkan residu yang relatif rendah, serta memiliki tingkat keamanan yang lebih tinggi bagi organisme non-target dibandingkan pestisida kimia konvensional. Dengan karakteristik tersebut, metabolit sekunder tumbuhan menjadi salah satu sumber daya hayati yang potensial untuk dikembangkan sebagai komponen utama biopestisida organik dalam mendukung sistem pengendalian hama yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (Marrone, 2024).



Gambar 3. Klasifikasi Metabolit Sekunder Tumbuhan

Alkaloid merupakan kelompok metabolit sekunder yang mengandung atom nitrogen dan dikenal memiliki aktivitas biologis yang tinggi terhadap berbagai organisme. Pada tumbuhan, senyawa ini berfungsi sebagai bagian dari mekanisme pertahanan alami terhadap serangan herbivora dan serangga. Dalam aplikasi sebagai biopestisida, alkaloid umumnya bekerja sebagai neurotoksin yang mengganggu sistem saraf serangga sehingga menyebabkan penurunan aktivitas makan, gangguan pertumbuhan dan reproduksi, hingga kematian organisme target.

Beberapa alkaloid yang telah banyak dikaji sebagai bahan aktif biopestisida antara lain nikotin yang terdapat pada tembakau (*Nicotiana tabacum*), kafein dari

tanaman kopi (*Coffea* spp.), serta berberin yang ditemukan pada berbagai spesies tanaman obat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa senyawa-senyawa tersebut efektif menekan populasi serangga hama sekaligus mengurangi tingkat kerusakan tanaman, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai komponen biopestisida ramah lingkungan (Koul, 2024).

Terpenoid

Terpenoid merupakan kelompok metabolit sekunder terbesar pada tumbuhan dan banyak ditemukan sebagai komponen utama minyak atsiri. Kelompok senyawa ini memiliki spektrum aktivitas biologis yang luas sehingga banyak dimanfaatkan sebagai bahan aktif pestisida nabati. Terpenoid diketahui dapat berperan sebagai insektisida, fungisida, repelan, maupun pengatur pertumbuhan serangga.

Salah satu contoh terpenoid yang paling banyak dimanfaatkan adalah azadirachtin yang berasal dari tanaman mimba (*Azadirachta indica*). Senyawa ini terbukti mampu menghambat proses pergantian kulit (*molting*) dan perkembangan serangga sehingga mengganggu siklus hidupnya. Selain itu, sitronelal yang terdapat pada serai (*Cymbopogon citratus*) serta mentol dari tanaman mint (*Mentha* spp.) memiliki aktivitas repelan yang efektif dalam mengurangi keberadaan berbagai jenis serangga hama. Efektivitas biologis yang tinggi serta dampak lingkungan yang relatif rendah menjadikan kelompok terpenoid sebagai salah satu bahan aktif utama dalam pengembangan formulasi biopestisida modern (Raveau *et.al.*, 2025).

Flavonoid

Flavonoid merupakan kelompok senyawa fenolik yang tersebar luas pada berbagai jenis tumbuhan dan memiliki peran penting dalam sistem pertahanan tanaman. Selain berfungsi sebagai antioksidan alami, flavonoid juga menunjukkan aktivitas antimikroba, insektisida, dan penginduksi ketahanan tanaman terhadap serangan patogen. Mekanisme kerjanya meliputi gangguan terhadap proses metabolisme serangga, penghambatan perkembangan larva, serta peningkatan respons pertahanan tanaman terhadap infeksi.

Berbagai penelitian terkini melaporkan bahwa flavonoid mampu menghambat pertumbuhan sejumlah jamur dan bakteri penyebab penyakit tanaman. Aktivitas biologis tersebut menunjukkan bahwa flavonoid memiliki prospek yang baik sebagai bahan aktif biopestisida organik berbasis sumber daya hayati yang aman bagi lingkungan dan organisme non-target (Wang *et.al.*, 2024).

Tanin dan Saponin

Tanin dan saponin merupakan kelompok metabolit sekunder yang telah lama dimanfaatkan sebagai komponen utama dalam pestisida nabati tradisional. Tanin bekerja dengan membentuk ikatan kompleks dengan protein pada saluran pencernaan serangga sehingga menghambat proses pencernaan dan penyerapan nutrisi. Kondisi tersebut menyebabkan pertumbuhan dan perkembangan hama menjadi terganggu.

Di sisi lain, saponin memiliki kemampuan merusak integritas membran sel melalui interaksi dengan sterol penyusun membran organisme target. Kerusakan membran sel tersebut mengakibatkan gangguan fisiologis yang dapat berujung pada kematian serangga maupun mikroorganisme patogen. Sifatnya yang mudah terdegradasi dan memiliki dampak lingkungan yang relatif rendah menjadikan tanin dan saponin sebagai kandidat potensial dalam pengembangan biopestisida organik

untuk mendukung sistem pertanian berkelanjutan (Moghadamtousi *et.al.*, 2023).

Mekanisme Kerja Biopestisida Berbasis Metabolit Sekunder

Biopestisida organik yang memanfaatkan metabolit sekunder tumbuhan memiliki mekanisme kerja yang beragam sehingga mampu mengendalikan organisme pengganggu melalui berbagai jalur fisiologis. Keanekaragaman mekanisme tersebut meningkatkan efektivitas pengendalian sekaligus menurunkan risiko munculnya resistensi dibandingkan pestisida sintesis yang umumnya hanya memiliki satu target aksi.

Mekanisme kerja utama metabolit sekunder sebagai biopestisida meliputi:

- **Antifeedant**, yaitu menghambat aktivitas makan serangga sehingga mengurangi kerusakan tanaman.
- **Repelen**, yaitu mengurangi ketertarikan hama terhadap tanaman dan mengusirnya dari area budidaya.
- **Pengatur pertumbuhan (*growth regulator*)**, yaitu mengganggu proses pertumbuhan, pergantian kulit, dan metamorfosis serangga.
- **Racun kontak (*contact toxicant*)**, yaitu menyebabkan kematian organisme setelah terjadi kontak langsung dengan senyawa aktif.
- **Antimikroba**, yaitu menghambat pertumbuhan maupun perkembangan jamur dan bakteri penyebab penyakit tanaman.
- **Penghambat reproduksi**, yaitu menurunkan fertilitas, viabilitas telur, dan keberhasilan reproduksi organisme pengganggu (Fenibo & Matambo, 2022).

Keragaman mekanisme tersebut menyebabkan tekanan seleksi terhadap organisme target menjadi lebih rendah sehingga peluang terbentuknya resistensi juga lebih kecil dibandingkan penggunaan pestisida sintesis yang bekerja melalui satu mekanisme spesifik (Marrone, 2024).

Potensi Tumbuhan sebagai Sumber Biopestisida Organik

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat keanekaragaman hayati tertinggi di dunia yang memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku biopestisida organik. Kekayaan flora yang dimiliki menyediakan berbagai spesies tumbuhan penghasil metabolit sekunder dengan aktivitas biologis sebagai insektisida, fungisida, bakterisida, maupun repelan alami. Pemanfaatan senyawa bioaktif tersebut menjadi salah satu alternatif pengendalian organisme pengganggu yang lebih ramah lingkungan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pestisida sintesis yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan ekosistem (Marrone, 2024).

Beberapa jenis tumbuhan yang memiliki prospek tinggi sebagai sumber biopestisida organik meliputi mimba (*Azadirachta indica*), serai (*Cymbopogon citratus*), tembakau (*Nicotiana tabacum*), sirsak (*Annona muricata*), dan srikaya (*Annona squamosa*). Mimba diketahui menghasilkan azadirachtin yang berfungsi sebagai insektisida alami sekaligus antifeedant yang mampu menghambat aktivitas

makan dan perkembangan serangga. Serai mengandung sitronelal yang efektif sebagai repelan alami, sedangkan tembakau menghasilkan nikotin yang bekerja sebagai neurotoksin terhadap serangga. Adapun sirsak dan srikaya mengandung senyawa acetogenin yang memiliki aktivitas sebagai insektisida, fungisida, serta racun kontak terhadap berbagai organisme pengganggu tanaman (Raveau *et.al.*, 2025).

Sejumlah penelitian melaporkan bahwa ekstrak daun, biji, maupun buah sirsak dan srikaya efektif dalam mengendalikan berbagai hama utama pada tanaman pangan maupun hortikultura. Aktivitas tersebut terutama disebabkan oleh keberadaan acetogenin yang mampu menghambat proses respirasi sel pada organisme target sehingga menyebabkan kematian hama. Tingginya efektivitas pengendalian, dipadukan dengan sifat senyawa yang mudah mengalami biodegradasi, menjadikan kedua tanaman tersebut sebagai sumber bahan aktif yang prospektif untuk pengembangan pestisida nabati komersial dalam mendukung praktik pertanian berkelanjutan (Anshary *et.al.*, 2023).

Tabel 1. Tanaman Potensial sebagai Sumber Biopestisida Organik

Tanaman	Senyawa Aktif	Aktivitas Biologis
Mimba (<i>Azadirachta indidica</i>)	Azadirachtin	Insektisida, antifeedant
Serai (<i>Cymbopogon citratus</i>)	Sitronelal	Repelan
Tembakau (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Nikotin	Insektisida
Sirsak (<i>Annona muricata</i>)	Acetogenin	Racun kontak
Srikaya (<i>Annona squamosa</i>)	Acetogenin	Insektisida, fungisida

Kontribusi Biopestisida terhadap Pertanian Berkelanjutan

Pemanfaatan metabolit sekunder tumbuhan sebagai bahan aktif biopestisida organik memberikan kontribusi yang penting dalam mendukung terwujudnya sistem pertanian berkelanjutan. Sebagai produk yang berasal dari sumber daya hayati terbarukan, biopestisida menawarkan alternatif pengendalian organisme pengganggu tanaman yang lebih ramah lingkungan dibandingkan pestisida sintesis. Karakteristiknya yang mudah mengalami biodegradasi memungkinkan penurunan akumulasi residu bahan kimia pada hasil pertanian serta mengurangi risiko pencemaran tanah dan perairan akibat penggunaan pestisida konvensional secara berlebihan (Fenibo & Matambo, 2022).

Selain memberikan manfaat terhadap kualitas lingkungan, penggunaan biopestisida juga berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Senyawa bioaktif yang berasal dari tumbuhan umumnya memiliki tingkat selektivitas yang lebih tinggi terhadap organisme sasaran sehingga dampaknya terhadap musuh alami, serangga penyerbuk, dan organisme non-target lainnya relatif lebih rendah. Kondisi tersebut berkontribusi pada pelestarian keanekaragaman hayati di lahan pertanian yang merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga stabilitas dan keberlanjutan ekosistem. Oleh karena itu, biopestisida menjadi komponen penting dalam penerapan sistem pertanian organik maupun budidaya pertanian yang berorientasi pada kelestarian lingkungan (Marrone, 2024).

Penerapan biopestisida juga sangat sesuai dengan konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT) atau *Integrated Pest Management* (IPM), yaitu pendekatan pengendalian yang mengintegrasikan berbagai metode pengelolaan organisme pengganggu secara ekologis. Integrasi biopestisida dalam sistem PHT mampu

meningkatkan efektivitas pengendalian hama sekaligus mengurangi tekanan seleksi yang memicu berkembangnya resistensi akibat penggunaan pestisida sintetis secara berulang. Dengan demikian, pemanfaatan biopestisida tidak hanya mendukung peningkatan produktivitas pertanian, tetapi juga berkontribusi terhadap pelestarian sumber daya alam dan keberlanjutan sistem produksi pertanian dalam jangka panjang (Kumar *et.al.*, 2024).

Tantangan dan Prospek Pengembangan Biopestisida

Meskipun memiliki berbagai keunggulan dibandingkan pestisida sintetis, pengembangan biopestisida berbasis metabolit sekunder tumbuhan masih menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu kendala utama adalah tingginya variasi kandungan senyawa bioaktif yang dipengaruhi oleh faktor genetik, kondisi lingkungan tempat tumbuh, umur tanaman, serta metode ekstraksi yang digunakan. Variabilitas tersebut dapat menyebabkan efektivitas biopestisida menjadi kurang konsisten sehingga menyulitkan proses standarisasi mutu dan formulasi produk (Raveau *et.al.*, 2025).

Tantangan lainnya berkaitan dengan karakteristik metabolit sekunder yang umumnya memiliki stabilitas rendah terhadap paparan cahaya, suhu tinggi, maupun proses oksidasi. Kerentanan tersebut dapat mempercepat degradasi senyawa aktif selama penyimpanan ataupun setelah diaplikasikan di lapangan, sehingga mengurangi efektivitas pengendalian. Selain itu, umur simpan produk yang relatif singkat, keterbatasan teknologi formulasi komersial, serta rendahnya tingkat adopsi teknologi oleh petani masih menjadi hambatan dalam pengembangan dan pemanfaatan biopestisida secara lebih luas (Campos *et.al.*, 2024).

Di sisi lain, prospek pengembangan biopestisida berbasis metabolit sekunder tumbuhan sangat menjanjikan seiring dengan pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Inovasi pada teknologi ekstraksi, nanoenkapsulasi, metabolomik, serta rekayasa metabolik membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi produksi, stabilitas, dan efektivitas senyawa bioaktif. Teknologi nanoenkapsulasi, misalnya, mampu melindungi metabolit sekunder dari degradasi akibat pengaruh lingkungan sehingga memperpanjang umur simpan sekaligus meningkatkan efisiensi pelepasan bahan aktif pada organisme sasaran. Dengan meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap keamanan pangan dan kelestarian lingkungan, serta berkembangnya teknologi formulasi biopestisida, penggunaan biopestisida diproyeksikan akan menjadi salah satu komponen utama dalam sistem pertanian berkelanjutan pada masa mendatang (Campos *et.al.*, 2024; Marrone, 2024).



Gambar 2. Biopestisida Berbasis Metabolit Sekunder

KESIMPULAN

Metabolit sekunder tumbuhan merupakan sumber senyawa bioaktif yang memiliki potensi besar sebagai bahan aktif biopestisida organik dalam mendukung pembangunan pertanian berkelanjutan. Berbagai kelompok metabolit sekunder, seperti alkaloid, terpenoid, flavonoid, tanin, dan saponin, menunjukkan mekanisme kerja yang beragam, antara lain sebagai antifeedant, repelan, insektisida, fungisida, bakterisida, pengatur pertumbuhan, serta penghambat reproduksi organisme pengganggu tanaman. Keragaman mekanisme tersebut menjadikan biopestisida berbasis metabolit sekunder lebih ramah lingkungan, memiliki risiko residu yang rendah, relatif aman bagi organisme non-target, serta berpotensi menekan perkembangan resistensi hama dibandingkan pestisida sintetis.

Pemanfaatan biopestisida organik juga berkontribusi terhadap pelestarian kualitas lingkungan, peningkatan keamanan pangan, serta penguatan penerapan Pengendalian Hama Terpadu (PHT) sebagai bagian dari sistem pertanian berkelanjutan. Walaupun pengembangannya masih menghadapi tantangan berupa variasi kandungan senyawa aktif, keterbatasan stabilitas, dan formulasi produk, kemajuan teknologi ekstraksi, nanoenkapsulasi, serta rekayasa metabolik memberikan peluang yang besar untuk meningkatkan efektivitas dan kualitas biopestisida di masa depan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang berfokus pada standarisasi bahan baku, optimasi formulasi, uji efektivitas di lapangan, serta hilirisasi produk agar biopestisida berbasis metabolit sekunder dapat dimanfaatkan secara lebih luas dalam mendukung sistem pertanian yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Anshary, A., Nurhidayat, N., & Wahyuni, S. (2023). Potensi ekstrak *Annona muricata* dan *Annona squamosa* sebagai pestisida nabati ramah lingkungan. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 27(2), 145–156.

- Assefa, A. *et.al.* (2026). Biological Pesticides as Viable Alternative to Synthetic Pesticides for Sustainable Agriculture and Nutrition: A Systematic Review. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*.
- Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., & Fraceto, L. F. (2024). Nanotechnology for botanical pesticides: Challenges and opportunities in sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(5), 3120–3138.
- Fenibo, E. O., & Matambo, T. (2021). Biopesticides in Sustainable Agriculture: A Critical Sustainable Development Driver Governed by Green Chemistry Principles. *Frontiers in Sustainable Food Systems*.
- Fenibo, E. O., & Matambo, T. (2022). The Potential and Green Chemistry Attributes of Biopesticides for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 14(21), 14417.
- Fenibo, E. O., & Matambo, T. (2022). Biopesticides in sustainable agriculture: A critical sustainable development driver governed by green chemistry principles. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 796075.
- Hubbard, M., Hynes, R. K., Erlandson, M., & Bailey, K. L. (2014). The Biochemistry Behind Biopesticide Efficacy. *Sustainable Chemical Processes*.
- Isman, M. B. (2023). Botanical insecticides in the twenty-first century—fulfilling their promise? *Annual Review of Entomology*, 68, 45–62.
- Koul, O. (2024). Plant secondary metabolites as natural pest management agents: Recent advances and future prospects. *Journal of Pest Science*, 97(1), 1–18.
- Kumar, S., Singh, A., & Sharma, P. (2024). Integration of botanical pesticides in integrated pest management systems for sustainable crop production. *Crop Protection*, 178, 106578.
- Marrone, P. G. (2024). Biopesticides and sustainable agriculture: Current status and future opportunities. *Agronomy*, 14(2), 315.
- Moghadamtousi, S. Z., *et.al.* (2023). Plant-derived Saponins and Tannins as Eco-friendly Pest Control Agents. *Plants*, 12(19), 3442.
- Raveau, R., Fontaine, J., & Lounès-Hadj Sahraoui, A. (2025). Plant extracts as sustainable alternatives to synthetic pesticides: Recent developments and agricultural applications. *Plants*, 14(1), 85.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., *et.al.* (2023). Secondary metabolites and their role in plant defense mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 107–121.
- Thakur, M. *et.al.* (2024). Microbial Production of Biopesticides for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 16(17), 7496
- Wang, Y., Li, X., Zhang, H., & Chen, J. (2024). Flavonoids as Natural Antimicrobial and Insecticidal Compounds in Sustainable Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1384521.

Yang, L., Zhao, Y., Zhang, X., & Chen, H. (2024). Advances in understanding plant secondary metabolites and their ecological functions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1362458