



JURNAL ILMU-ILMU PERTANIAN
POLITEKNIK PEMBANGUNAN PERTANIAN
YOGYAKARTA-MAGELANG
P-ISSN: 1858-1226; E-ISSN: 2723-4010



Penerapan Biopestisida Nabati untuk Pertanian Ramah Lingkungan Dalam Meningkatkan Hasil dan Keseimbangan Ekosistem

Errin Desynta Listiyani ^{1*)}

¹ BPP Puramartani Kecamatan Sapuran, Dinas Pangan Pertanian dan Perikanan Kabupaten Wonosobo

*) Corresponding Author: errindesynta@gmail.com

Article Info

Article History:

Received: June, 19th, 2025

Accepted: July, 9th, 2025

Published: July, 15th, 2025

Kata Kunci:

Biopestisida nabati
Ekosistem
Pengendalian hama
Pertanian ramah lingkungan

Keywords:

Botanical biopesticide
Ecosystem
Environmentally friendly
agriculture
Pest control

ABSTRAK

Penggunaan pestisida sintetis secara terus-menerus menimbulkan dampak serius seperti pencemaran lingkungan, hilangnya keanekaragaman hayati, dan resistensi hama terhadap bahan kimia, sehingga diperlukan alternatif yang lebih ramah lingkungan seperti biopestisida nabati. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji tren, efektivitas, dan potensi penerapan biopestisida nabati dalam mendukung pertanian ramah lingkungan guna meningkatkan hasil panen dan menjaga keseimbangan ekosistem. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pendekatan bibliometrik, berdasarkan 21 artikel terbitan 2020–2025 yang diidentifikasi dari Google Scholar, ScienceDirect, dan Wiley Online Library. Analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer dengan fokus pada kata kunci seperti *biopesticide*, *botanical insecticide*, dan *pest population*. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan biopestisida dari bahan seperti bawang putih, jahe, neem, dan umbi gadung terbukti efektif menekan populasi hama serta memperbaiki kualitas tanah dan biodiversitas. Visualisasi bibliometrik mengungkapkan peningkatan signifikan dalam minat riset sejak tahun 2023. Temuan ini memperkuat urgensi integrasi biopestisida dalam sistem pertanian berkelanjutan berbasis komunitas.

ABSTRACT

The continuous use of synthetic pesticides has caused serious impacts such as environmental pollution, loss of biodiversity, and pest resistance to chemicals, thus highlighting the need for more environmentally friendly alternatives such as plant-based biopesticides. This study aimed to examine the trends, effectiveness, and potential application of botanical biopesticides in supporting environmentally friendly agriculture to increase crop yields and maintain ecosystem balance. The method used is a Systematic Literature Review (SLR) with a bibliometric approach, based on 21 articles published between 2020 and 2025 identified from Google Scholar, ScienceDirect, and Wiley Online Library. The analysis was carried out using VOSviewer software, focusing on keywords such as biopesticide, botanical insecticide, and pest population. The results show that biopesticides derived from ingredients such as garlic, ginger, neem, and yam have proven effective in suppressing pest populations while improving soil quality and biodiversity. The bibliometric visualization revealed a significant increase in research interest since 2023. These findings reinforce the importance of integrating biopesticides into community-based, sustainable agricultural systems.

PENDAHULUAN

Pertanian memegang peran penting dalam menjamin ketahanan pangan global. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, sistem pertanian modern mengalami tekanan besar akibat degradasi lingkungan, penggunaan bahan kimia yang berlebihan, serta menurunnya kualitas ekosistem pertanian. Penggunaan pestisida sintesis yang terus menerus, meskipun efektif dalam jangka pendek, telah memicu berbagai persoalan serius seperti pencemaran tanah dan air, hilangnya keanekaragaman hayati, serta munculnya resistensi hama terhadap bahan kimia (Zhou et al., 2025). Adanya ancaman tersebut, mengakibatkan semakin besar kebutuhan untuk menemukan alternatif yang lebih aman dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang mulai dilirik secara luas adalah penggunaan biopestisida nabati, yakni pestisida berbahan dasar tanaman yang mengandung senyawa aktif alami. Metode ini diyakini lebih ramah lingkungan karena bersifat mudah terurai, tidak menyisakan residu berbahaya, dan minim risiko terhadap kesehatan manusia dan hewan (Butu et al., 2020). Selain itu, potensi besar biopestisida nabati juga datang dari kekayaan hayati negara-negara tropis seperti Indonesia, yang menyimpan berbagai jenis tanaman berkhasiat sebagai pengendali hama alami. Meski begitu, penggunaan biopestisida masih menghadapi kendala dalam hal adopsi, formulasi, dan efektivitasnya di berbagai kondisi lapangan.

Permasalahan ini juga berkaitan erat dengan urgensi menciptakan sistem pertanian yang tidak hanya berorientasi pada hasil panen, tetapi juga pada kelestarian ekosistem. Keberlanjutan dalam pertanian harus mencakup perlindungan terhadap serangga penyerbuk, mikroorganisme tanah, dan keseimbangan unsur hayati lainnya yang menjadi penopang ekosistem. Sementara itu, pengendalian hama seharusnya tidak merusak tatanan ekologi yang sudah ada, melainkan mendukung terciptanya sistem pertanian yang lebih seimbang dan resilien (Jacquet et al., 2022). Meskipun minat terhadap biopestisida terus tumbuh, masih terdapat kesenjangan dalam penelitian yang menyatukan antara aspek peningkatan produktivitas pertanian dan pemulihan ekosistem secara bersamaan. Penelitian Briolat et al. (2021) yang masih terfokus pada uji efektivitas terhadap jenis hama tertentu tanpa mengaitkannya secara menyeluruh dengan dampak ekologis yang lebih luas. Selain itu, literatur ilmiah yang ada belum banyak mengulas potensi kombinasi antar jenis biopestisida nabati atau integrasinya dalam sistem pertanian yang berkelanjutan secara komprehensif.

Melihat kompleksitas isu tersebut, diperlukan kajian yang mampu menghimpun dan menyintesis pengetahuan ilmiah secara sistematis. Analisis yang tidak hanya melihat dari sudut pandang agronomi, tetapi juga mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan dan keseimbangan hayati, sangat dibutuhkan. Selain itu, pemetaan tren dan peta penelitian melalui pendekatan bibliometrik dapat membantu melihat sejauh mana fokus ilmiah dalam topik ini telah berkembang, serta mengidentifikasi area yang masih belum tergarap secara optimal (Ananda et al., 2025). Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara mendalam penerapan biopestisida nabati dalam konteks pertanian ramah lingkungan, khususnya dalam upaya meningkatkan hasil panen dan menjaga keseimbangan ekosistem. Pendekatan Analisis *Systematic Literature Review* (SLR) dan analisis bibliometrik melalui VOSviewer digunakan untuk mengungkap lanskap ilmiah dan arah perkembangan keilmuan terkait penggunaan biopestisida, serta menyusun dasar yang kuat bagi pengembangan strategi pertanian yang lebih berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) yang dikombinasikan dengan analisis bibliometrik untuk menelusuri tren, tema utama, dan arah pengembangan ilmiah terkait penerapan biopestisida nabati dalam mendukung pertanian ramah lingkungan. Metode ini dipilih karena mampu menyajikan pemetaan tematik dan analisis perkembangan wacana secara sistematis dan kuantitatif, sebagaimana direkomendasikan oleh Bartolini et al. (2019) dan (Huang et al., 2020). Protokol PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) digunakan sebagai pedoman dalam empat tahap utama: identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi (Page et al., 2021). Penggabungan metode SLR dan bibliometrik dilakukan karena keduanya memiliki struktur prosedural yang serupa, dimulai dari perumusan tujuan dan pertanyaan penelitian, strategi pencarian data, pengolahan dan validasi data, hingga visualisasi bibliometrik. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan kecenderungan topik dan terminologi penting yang muncul dari literatur terkait penggunaan biopestisida berbasis tanaman serta dampaknya terhadap hasil pertanian dan keseimbangan ekosistem.

Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data utama: Google Scholar, ScienceDirect, dan Wiley Online Library, dengan rentang publikasi antara 2020 hingga 2025. Artikel yang digunakan terdiri dari literatur berbahasa Inggris dan Indonesia. Seleksi dilakukan dengan menyaring jenis dokumen berupa artikel jurnal (*research article* dan *review article*) yang relevan dan terbuka akses. Strategi pencarian dikembangkan menggunakan pendekatan Boolean Logic yang ditampilkan pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Strategi Kata Kunci Pencarian (Boolean Logic)

No	Bahasa	Tema Utama	Kata Kunci Boolean
1	Inggris	<i>Biopesticides</i>	"botanical pesticide" OR "plant-based biopesticide" OR "bioinsecticide"
2	Indonesia	Pertanian Ramah Lingkungan	"pestisida nabati" OR "biopestisida tanaman" AND "pertanian ramah lingkungan"

Hasil pencarian disaring berdasarkan jenis dokumen (artikel jurnal dan review), bahasa (Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia), dan periode publikasi. Data hasil pencarian disimpan dalam format CSV dan diorganisasi melalui perangkat lunak manajemen referensi *Mendeley*. Tahap berikutnya adalah proses penyaringan berdasarkan kriteria eksklusi, seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Total Kriteria Eksklusi Artikel

No	Kriteria Eksklusi	Jumlah Artikel Tereksklusi
1	Artikel tidak ditulis dalam Bahasa Inggris	2 artikel
2	Tidak relevan dengan topik (tidak mengandung kata kunci utama)	145 artikel
3	Artikel duplikat dari database yang berbeda	4 artikel
Total		151 Artikel

Berdasarkan total artikel yang ditemukan, diperoleh **64 artikel** yang memenuhi kriteria inklusi dan dilanjutkan pada tahap selanjutnya. Artikel-artikel ini merupakan hasil kajian terbaru yang memuat pendekatan teknologi biopestisida nabati, dampaknya terhadap hasil panen, keseimbangan ekosistem, dan keberlanjutan sistem pertanian.

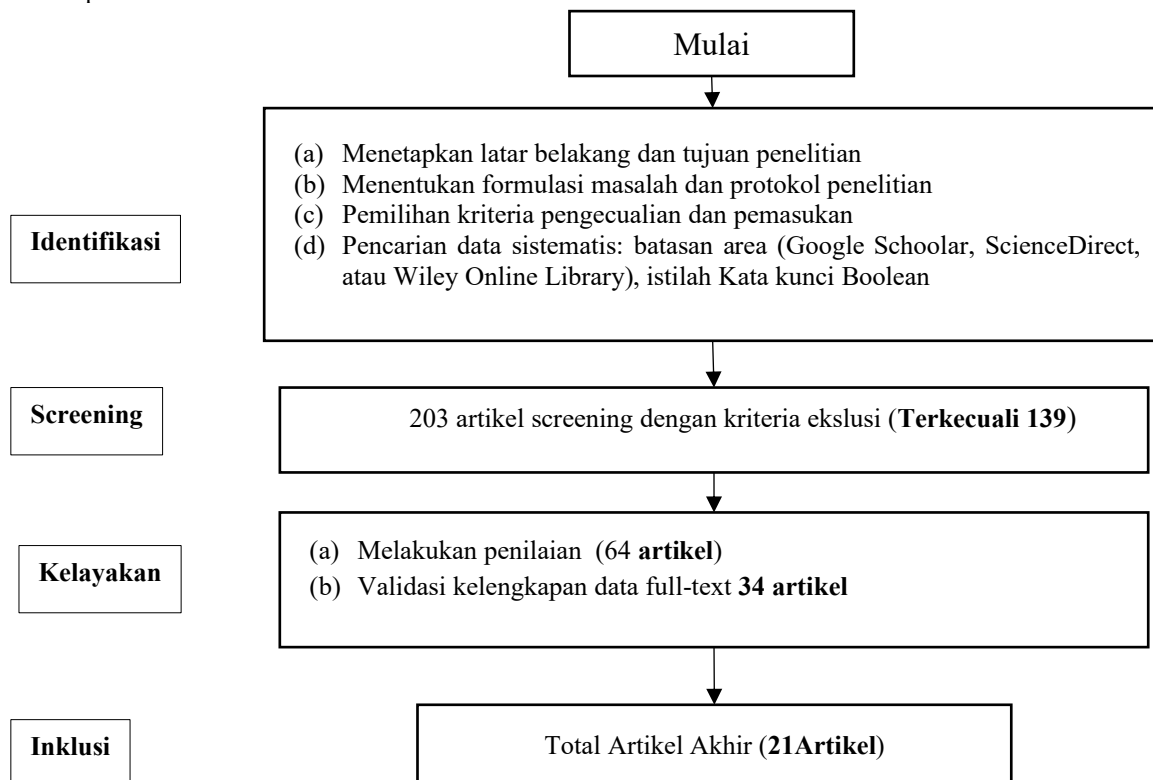
**Gambar 1. Alur Diagram PRISMA**

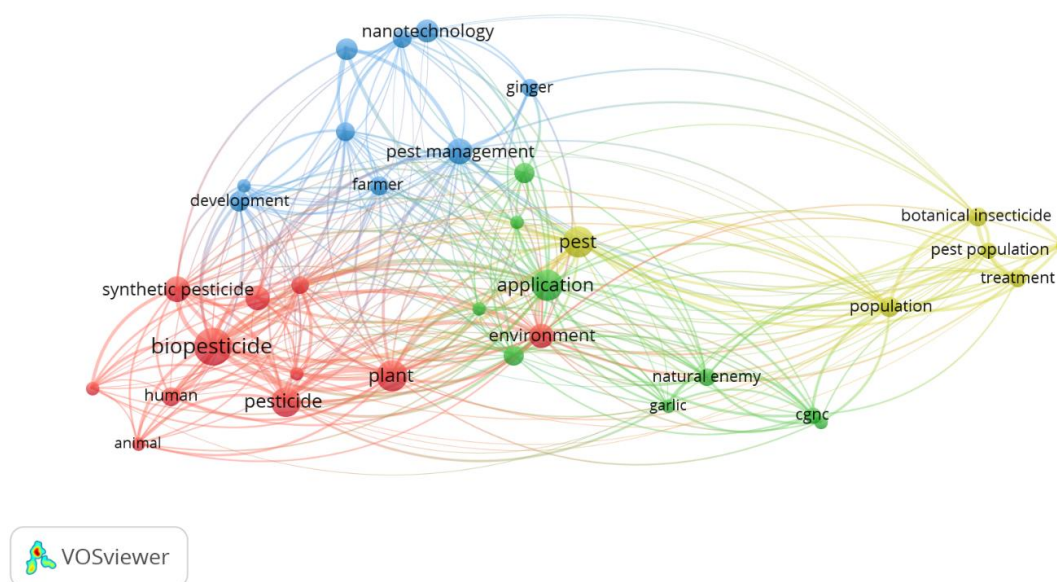
Diagram aliran dalam Gambar 1 melakukan proses ringkasan detail dari SLR dan bibliometrik analisis dalam langkah-langkah berikut: (1) Proses identifikasi, pertama-tama, tujuan dijelaskan. Kemudian, penting untuk mengembangkan protokol tinjauan. Ini dilanjutkan untuk menentukan batasan konseptual dari studi. Langkah-langkah berikutnya adalah pencarian data sistematis dari Google Scholar, artikel jurnal dari tahun 2020 hingga 2025 (2=, 203 artikel diekstraksi menggunakan kriteria eksklusi. Selanjutnya, 139 artikel dikecualikan, dan 64 artikel melanjutkan ke level berikutnya; (3) Proses kelayakan, artikel-artikel harus divalidasi dan diselesaikan, dan (4) akhirnya, inklusi menetapkan 21 artikel dalam teks penuh yang memenuhi

syarat data yang telah tersaring kemudian dianalisis secara bibliometrik menggunakan perangkat lunak VOSviewer, dengan fokus utama pada analisis *co-occurrence* kata kunci. Visualisasi dilakukan dalam tiga format: *network visualization*, *overlay visualization*, dan *density visualization*, guna mengidentifikasi topik dominan, terminologi penting, dan dinamika perkembangan penelitian secara tematik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Network Visualization

Gambar 2 yang menunjukkan *Network Visualization* merupakan hasil pemetaan bibliometrik menggunakan VOSviewer yang menggambarkan keterhubungan antar kata kunci dalam topik “Penerapan Biopestisida Nabati untuk Pertanian Ramah Lingkungan dalam Meningkatkan Hasil dan Keseimbangan Ekosistem”. Warna-warna pada jaringan menunjukkan pembagian kluster topik, sedangkan ukuran dan ketebalan garis merepresentasikan frekuensi dan kekuatan keterkaitan antar konsep. Gambar ini penting sebagai dasar analisis arah penelitian dan identifikasi topik-topik dominan maupun emerging yang berkaitan dengan biopestisida.



Gambar 2. Network Visualization Vosviewer

Gambar 2 menunjukkan *network visualization* berdasarkan *network visualization* dari VOSviewer yang dilampirkan, terdapat sejumlah topik yang masih jarang dibahas dalam literatur ilmiah terkait biopestisida. Hal ini ditunjukkan oleh posisi node (lingkaran) yang berada di tepi dan memiliki ukuran kecil serta garis penghubung (link) yang relatif jarang atau tipis. Salah satu topik yang menonjol sebagai *underexplored area* adalah "botanical insecticide" dan "treatment", yang berada di ujung kanan atas dari visualisasi dan berwarna kuning. Meskipun memiliki keterkaitan dengan node utama seperti *pest* dan *application*, keberadaan mereka yang menyendiri dan jarang terhubung dengan node besar lainnya menunjukkan bahwa kombinasi aplikasi pestisida nabati dalam konteks perlakuan atau formulasi terpadu masih jarang diteliti secara mendalam, terutama yang mengintegrasikan aspek populasi, teknik aplikasi, dan interaksi dengan musuh alami.

Selain itu, topik seperti "garlic" dan "CGNC" (campuran cabai, bawang putih, neem, dan urin sapi) juga tampak sebagai node hijau yang kecil dan berada di sisi jaringan. Ini mengindikasikan bahwa meskipun penggunaannya mulai muncul di praktik pertanian organik (lihat Singh et al., 2021), riset ilmiah yang mendalam terhadap efektivitas dan dampak ekologis jangka panjang dari formulasi seperti CGNC terhadap keberlanjutan sistem pertanian masih terbatas. Hal ini diperkuat oleh temuan Reddy & Chowdary (2021) dan Basaid & Furze (2024) yang menyoroti pentingnya studi lebih lanjut tentang sinergi biopestisida botani dan mikroba, serta implikasinya pada efisiensi pestisida dan ketahanan ekosistem pertanian. Oleh karena itu, eksplorasi lanjutan pada kombinasi botani-mikroba seperti *botanical insecticide treatment*, CGNC, dan elemen aplikatifnya menjadi celah penting dalam penelitian pertanian berkelanjutan.

Sementara itu, pada *Cluster 1* (merah), terpusat pada istilah "*biopesticide*", "*synthetic pesticide*", "*plant*", dan "*pesticide*", yang menunjukkan fokus pada perbandingan antara pestisida nabati dan pestisida kimia serta dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Studi oleh Daraban et al. (2023) dan

Ayilara et al. (2023) secara konsisten menekankan bahwa pestisida kimia membawa dampak toksik terhadap manusia, hewan, dan lingkungan, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih berkelanjutan melalui penggunaan biopestisida. Šunjka & Mechora (2022) dan Gupta et al. (2023) menambahkan bahwa meskipun biopestisida lebih ramah lingkungan, tantangan efikasi dan stabilitas masih menjadi hambatan. Oleh karena itu, inovasi formulasi dan pendekatan berbasis senyawa aktif baru terus dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas biopestisida.

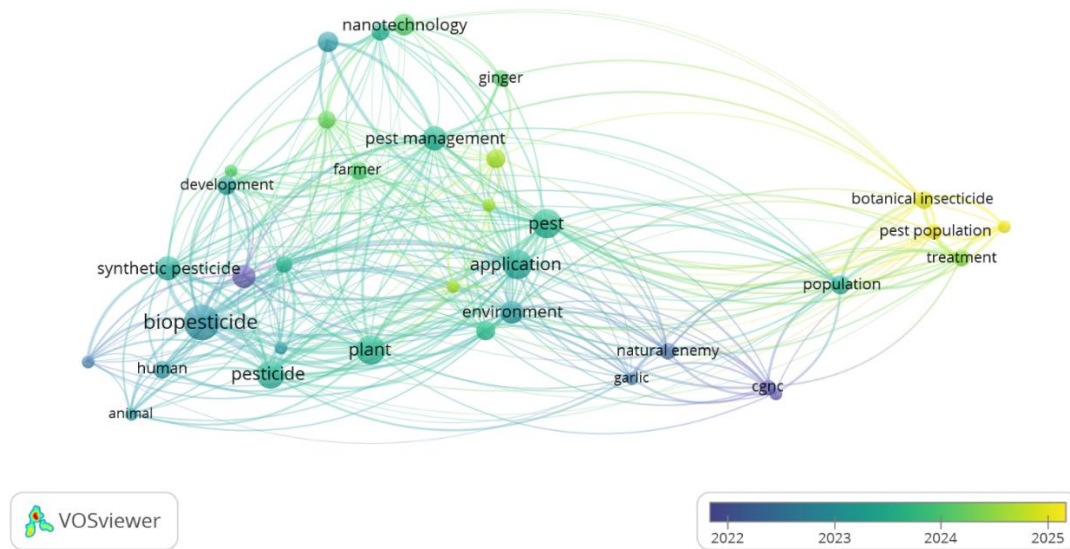
Dalam *Cluster 2* (hijau), fokus kata kunci seperti “*application*”, “*cgnc*”, “*natural enemy*”, dan “*garlic*” merefleksikan perhatian terhadap teknik aplikatif biopestisida serta sinergi dengan musuh alami dalam ekosistem. Singh et al. (2021) menunjukkan efektivitas formula CGNC (campuran cabai, bawang putih, neem, dan urin sapi) dalam menurunkan populasi hama tanpa mengganggu predator alami. Fairuz et al. (2024) dan Suhindarno et al. (2025) juga memperkuat pentingnya pelatihan petani dalam membuat dan menggunakan pestisida berbasis bawang putih yang mudah dibuat namun tetap efektif. Sementara itu, Reddy & Chowdary (2021) dan Basaid & Furze (2024) menyoroti pentingnya sinergi antara biopestisida botani dan mikroba untuk meningkatkan efek subletal pada hama sekaligus memperlambat resistensi.

Cluster 3 (biru) menghubungkan topik “*pest management*”, “*nanotechnology*”, “*farmer*”, dan “*ginger*” sebagai refleksi dari pendekatan teknologi dan partisipasi petani dalam sistem pertanian berkelanjutan. Rana et al. (2024) menjelaskan bahwa nanoteknologi dapat meningkatkan efisiensi pestisida dengan kontrol rilis yang presisi dan ramah lingkungan. Dalam konteks lokal, Siregar et al. (2024) menyoroti penggunaan jahe sebagai pestisida botani untuk mengatasi hama jagung sekaligus membuka peluang ekonomi ekspor. Afandi et al. (2024) dan Budi (2021) menekankan bahwa partisipasi petani dalam pelatihan dan pengelolaan organik merupakan kunci untuk keberhasilan adopsi pertanian ramah lingkungan.

Pada *Cluster 4* (kuning), kata kunci “*pest population*”, “*treatment*”, dan “*botanical insecticide*” merepresentasikan fokus terhadap efikasi langsung dari biopestisida terhadap populasi hama dan hasil panen. Sutanto et al. (2025) melaporkan bahwa penggunaan insektisida nabati mampu menurunkan populasi wereng coklat secara signifikan dengan peningkatan hasil panen padi tanpa menurunkan populasi predator alami. Hal ini memperlihatkan bahwa formulasi nabati dapat diintegrasikan ke dalam sistem *Integrated Pest Management* (IPM), seperti yang juga dibahas dalam Angon et al. (2023) dan Jamin et al. (2024). IPM menekankan pengurangan penggunaan bahan kimia dan penggunaan musuh alami, biopestisida, serta pendekatan budaya sebagai strategi terpadu yang lebih aman. Beberapa studi seperti Zuo et al. (2025), Gulo & Larosa (2025), dan Rabbaniah et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan biopestisida berbahan alami seperti gadung atau ekstrak daun sirsak tidak hanya efektif menurunkan populasi hama, tetapi juga menjaga keanekaragaman hayati dan memperbaiki struktur tanah. Dengan demikian, pendekatan lokal berbasis komunitas menjadi penting dalam diseminasi dan penerapan biopestisida.

Overlay Visualization

Overlay Visualization pada VOSviewer memberikan gambaran tentang perkembangan temporal topik penelitian berdasarkan tahun publikasi. Warna pada setiap node merepresentasikan rata-rata tahun kemunculan kata kunci dalam literatur, semakin mendekati kuning berarti semakin baru atau sering muncul dalam publikasi terbaru, sedangkan warna biru mengindikasikan kemunculan pada literatur yang lebih lama. Visualisasi ini sangat membantu dalam mengenali tren topik terkini dan arah pergeseran fokus riset di bidang penerapan biopestisida nabati untuk pertanian ramah lingkungan.



Gambar 3. Network Visualization Vosviewer

Dari visualisasi di atas, tampak bahwa kata kunci seperti "*synthetic pesticide*", "*biopesticide*", dan "*plant*" muncul lebih dominan dalam warna biru hingga biru kehijauan, menandakan bahwa diskursus mengenai perbandingan biopestisida dan pestisida sintesis serta peran tanaman sebagai sumber bahan aktif telah berkembang lebih awal, sekitar 2021–2022. Hal ini sejalan dengan temuan Daraban et al. (2023) Daraban et al. (2023) dan Ayilara et al. (2023) yang menekankan dampak negatif pestisida sintesis terhadap lingkungan dan kesehatan manusia serta perlunya pendekatan yang lebih ramah lingkungan. Kemudian, kata kunci seperti "*application*", "*environment*", "*pest management*", dan "*nanotechnology*" terlihat dalam nuansa hijau yang menunjukkan intensifikasi pembahasan pada kurun 2023. Studi oleh Rana et al. (2024) menegaskan peran teknologi baru dalam meningkatkan efektivitas aplikasi biopestisida, termasuk nanoteknologi yang mendukung efisiensi penyerapan bahan aktif dan mengurangi dampak lingkungan.

Sementara itu, kata kunci yang berwarna kuning seperti "*botanical insecticide*", "*pest population*", dan "*treatment*" mengindikasikan lonjakan minat pada tahun-tahun terbaru (2024–2025). Hal ini mengarah pada fokus baru dalam riset biopestisida, yaitu efektivitas pengendalian populasi hama berbasis tanaman. Studi lapangan oleh Sutanto et al. (2025) menunjukkan bahwa formulasi pestisida nabati seperti *Rajam 65* berhasil menurunkan populasi wereng secara signifikan, meningkatkan hasil panen, dan mempertahankan kestabilan ekosistem perairan. Selain itu, kata "*cgnc*" dan "*garlic*" yang semula berwarna ungu tua (2022), kini membentuk koneksi ke arah kata kunci kuning, menunjukkan bahwa formulasi tradisional seperti campuran cabai, bawang putih, neem, dan urin sapi telah mengalami peningkatan minat baru dan potensi perluasan aplikatif, sebagaimana dilaporkan dalam studi Singh et al. (2021) dan Fairuz et al. (2024).

Tabel 3. Frekuensi Artikel Penelitian Berdasarkan Tahun Terbit

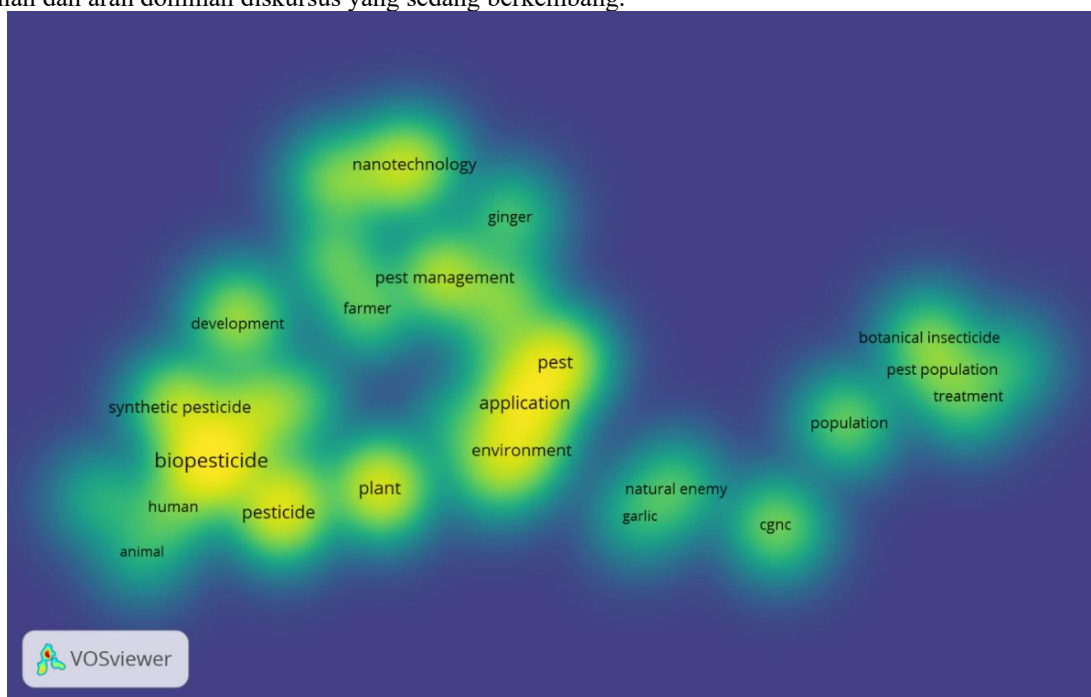
Tahun Terbit	Frekuensi Artikel	Persentase (%)
2020	0	0
2021	3	14
2022	1	5
2023	4	19
2024	7	33
2025	6	29
Total	21	100

Tabel 3 frekuensi artikel menunjukkan bahwa publikasi tentang topik ini meningkat secara signifikan sejak tahun 2023. Tahun 2021 menyumbang 14% artikel, dengan sedikit pertumbuhan pada 2022 (5%), namun lonjakan mulai terasa pada 2023 (19%), memuncak di tahun 2024 (33%), dan tetap tinggi di 2025 (29%). Distribusi ini menunjukkan adanya percepatan penelitian di bidang biopestisida, terutama dalam dua tahun terakhir.

Jika dikaitkan dengan Overlay Visualization, lonjakan publikasi di tahun 2024 dan 2025 paralel dengan munculnya warna kuning cerah pada kata kunci seperti "*botanical insecticide*", "*pest population*", dan "*treatment*". Ini mengindikasikan bahwa literatur terkini mulai terfokus pada tahap aplikatif dan pengukuran dampak langsung biopestisida terhadap produksi dan keberlanjutan ekosistem pertanian. Dalam konteks ini, publikasi terbaru seperti Zuo et al. (2025) dan Rohmah et al. (2025) berperan penting dalam mendorong pembahasan mengenai efektivitas, konservasi keanekaragaman hayati, serta kontribusi terhadap kesejahteraan petani.

Density Visualization

Gambar *Density Visualization* yang ditampilkan merupakan hasil pemetaan visual menggunakan VOSviewer untuk topik "Penerapan Biopestisida Nabati untuk Pertanian Ramah Lingkungan dalam Meningkatkan Hasil dan Keseimbangan Ekosistem". Peta ini menunjukkan sebaran kepadatan kata kunci berdasarkan frekuensi kemunculannya dalam dokumen yang dianalisis. Warna kuning cerah menandakan area dengan kepadatan tinggi (frekuensi tinggi), sedangkan warna hijau hingga biru tua menunjukkan kepadatan menengah hingga rendah. Visualisasi ini berguna untuk mengidentifikasi pusat perhatian utama dalam literatur ilmiah dan arah dominan diskursus yang sedang berkembang.



Gambar 4. Network Visualization Vosviewer

Pusat kepadatan tertinggi terlihat pada istilah "*biopesticide*", "*synthetic pesticide*", "*application*", "*pest*", dan "*environment*", yang ditandai dengan warna kuning terang. Hal ini menunjukkan bahwa topik-topik tersebut paling sering dibahas dan memiliki keterkaitan yang kuat dalam literatur tentang biopestisida nabati. Istilah "*biopesticide*" menjadi titik sentral karena merupakan topik utama dalam diskusi, sedangkan "*synthetic pesticide*" muncul sebagai topik pembanding yang menyoroti pergeseran paradigma dari penggunaan bahan kimia menuju solusi yang lebih ramah lingkungan. Studi seperti Daraban et al. (2023) dan Ayilara et al. (2023) menggarisbawahi pentingnya transisi ini demi keberlanjutan sistem pertanian dan kesehatan ekosistem. Istilah "*application*" dan "*pest*" yang juga padat menunjukkan bahwa perhatian besar diberikan pada bagaimana biopestisida diterapkan serta efektivitasnya dalam menanggulangi serangan organisme pengganggu tanaman. Dalam hal ini, riset oleh Sutanto et al. (2025) dan Singh et al. (2021) mendukung pentingnya formulasi dan teknik aplikasi yang tepat agar pengendalian hama dapat dilakukan tanpa mengganggu populasi musuh alami.

Area kepadatan menengah, seperti pada istilah "*nanotechnology*", "*pest management*", "*plant*", dan "*farmer*", memperlihatkan topik yang mulai banyak diteliti namun belum mendominasi sepenuhnya. Misalnya, Rana et al. (2024) menunjukkan potensi besar nanoteknologi dalam meningkatkan efektivitas dan efisiensi biopestisida, sementara Afandi et al. (2024) dan Budi (2021) menggarisbawahi pentingnya peran petani dan pelatihan dalam penerapan praktik ramah lingkungan. Sementara itu, area yang berwarna hijau hingga kebiruan seperti "*cgnc*", "*garlic*", "*natural enemy*", dan "*botanical insecticide*" menandakan tema-tema yang relatif baru atau belum banyak dijadikan fokus utama. Padahal, temuan dari Fairuz et al. (2024) dan Zuo et al. (2025) menunjukkan bahwa inovasi seperti formulasi CGNC dan insektisida nabati dari bawang

putih memiliki potensi besar dalam mendukung sistem pertanian organik dan menjaga keseimbangan biodiversitas.

Efektivitas Biopestisida Nabati

Penerapan biopestisida nabati dalam praktik pertanian terus mendapatkan perhatian karena kemampuannya mengatasi tantangan dari pestisida sintetis yang berdampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan. Menurut Daraban et al. (2023), bahan kimia sintetis yang digunakan secara luas menyebabkan pencemaran tanah dan air serta menimbulkan risiko kesehatan serius bagi manusia dan hewan. Oleh karena itu, penggunaan biopestisida yang bersifat biodegradable, selektif, dan aman menjadi solusi yang semakin relevan dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Berbagai studi menegaskan efektivitas biopestisida berbahan nabati seperti minyak atsiri (Gupta et al., 2023), umbi gadung (Rabbaniah et al., 2025), serta bawang putih (Fairuz et al., 2024). Formulasi CGNC (*chili, garlic, neem, cow urine*) terbukti secara signifikan menekan populasi hama di lahan organik tanpa memengaruhi musuh alami seperti laba-laba dan coccinellid (Singh et al., 2021). Bahkan, aplikasi kombinasi ini meningkatkan hasil panen okra secara signifikan, menunjukkan dampak langsung terhadap produktivitas tanaman.

Reddy & Chowdary (2021) dan Basaid & Furze (2024) menunjukkan bahwa kombinasi biopestisida botani dan mikroba memberikan efek subletal yang optimal terhadap hama, memperlambat resistensi, dan meningkatkan efisiensi pengendalian dengan dosis lebih rendah. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan ketergantungan pada pestisida kimia, tetapi juga membuka jalur baru dalam pengelolaan penyakit tanaman secara ekologis dan ekonomis. Studi lapangan dari Sutanto et al. (2025) menambah bukti bahwa insektisida nabati dapat meningkatkan hasil panen padi hingga 16%, sekaligus menjaga populasi predator alami. Berdasarkan hasil ini, biopestisida tidak hanya berperan dalam pengendalian hama, tetapi juga dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan peningkatan ekonomi petani.

Tabel 4. Inovasi Optimalisasi Biopestisida

Aspek Inovasi Teknologi dan Sosial Optimalisasi Biopestisida	Keterangan	Sumber
Nanobiopestisida	Menggunakan teknologi nano untuk pelepasan zat aktif yang terkontrol dan efisien	Rana et al. (2024); (Ayilara et al., 2023)
Pelatihan Petani Berbasis Komunitas	Pelatihan produksi biopestisida lokal untuk meningkatkan kemandirian dan kesadaran lingkungan	Afandi et al. (2024); Suhindarno et al. (2025)
Pestisida Jahe	Penggunaan jahe sebagai insektisida nabati untuk mengatasi Spodoptera frugiperda dan dorong ekspor organik	Siregar et al. (2024)
Pestisida Berbasis Umbi Gadung	Formulasi pestisida alami dari Dioscorea hispida untuk efisiensi biaya dan keberlanjutan	Rabbaniah et al. (2025)
CGNC (Cabai, Garlic, Neem, Cow urine)	Formulasi lokal yang efektif dalam pertanian organik untuk pengendalian hama tanpa merusak musuh alami	Singh et al. (2021)
Formulasi Gabungan Botani dan Mikrobial	Sinergi biopestisida botani dan mikroba untuk efisiensi dan mencegah resistensi	Reddy & Chowdary (2021); Basaid & Furze (2024)
Pestisida dari Minyak Atsiri Tanaman	Minyak esensial sebagai agen pengendalian hama yang spesifik, ramah lingkungan, dan biodegradable	Gupta et al. (2023)
Teknologi Nanoenkapsulasi	Inovasi nano untuk meningkatkan stabilitas dan efektivitas minyak atsiri sebagai biopestisida	Gupta et al. (2023)
Manajemen Hama Terpadu (IPM)	Integrasi biopestisida, musuh alami, dan pengelolaan habitat untuk keseimbangan ekosistem	Angon et al. (2023)
Pestisida Berbasis Sirsak dan Refugia	Mengurangi populasi hama pisang dengan bahan lokal dan konservasi keanekaragaman hayati	Gulo & Larosa (2025)

Pestisida Botani untuk Konservasi Biodiversitas	Mengendalikan hama lychee sambil mempertahankan keanekaragaman arthropoda	Zuo et al. (2025)
Pestisida Ramah Lingkungan bagi Ikan	Botanical insecticide diuji aman bagi tilapia dan ikan mas, mendukung ekosistem sawah	Sutanto et al. (2025)
Pestisida Bawang Putih Mandiri	Produksi pestisida dari bawang putih oleh petani di Ciherang secara mandiri	Fairuz et al. (2024)
Perbanyak Agens Hayati (<i>B. bassiana</i>)	Produksi mandiri jamur entomopatogen di tingkat desa untuk pengendalian hayati	Rohmah et al. (2025)
Nilai Spiritualitas dalam Pertanian	Integrasi prinsip tauhid dalam ekoteologi pertanian organik	Afandi et al. (2024)
Formulasi Botani + Sintetik Rendah Dosis	Penggunaan kombinasi botani dengan insektisida sintetis dosis rendah untuk hasil tinggi	Sutanto et al. (2025)
Penguatan Literasi Risiko Pestisida	Peningkatan kesadaran bahaya pestisida kimia melalui literasi masyarakat	Jamin et al. (2024)
Kebijakan Pertanian Berkelanjutan	UU dan kebijakan yang mendukung penggunaan biopestisida dalam jangka panjang	Budi (2021)
Inovasi Molekuler Biopestisida	Pendekatan bioteknologi untuk identifikasi senyawa tanaman efektif	Sathyananth et al. (2024)
Formulasi Aktif Baru	Pengembangan zat aktif biopestisida generasi baru yang lebih stabil	Šunjka & Mechora (2022)
Validasi In Situ Formulasi Baru	Uji efektivitas lapangan kombinasi agen botani dan mikroba	Basaid & Furze (2024)

Inovasi Teknologi dan Sosial dalam Optimalisasi Biopestisida

Transformasi teknologi memainkan peran penting dalam optimalisasi biopestisida. Rana et al. (2024) menjelaskan bahwa nanobiopestisida menawarkan keunggulan dalam efisiensi serapan dan pelepasan terkendali zat aktif. Teknologi ini membantu meminimalkan residu kimia di lingkungan sekaligus meningkatkan ketepatan pengendalian. Ayilara et al. (2023) juga mencatat bahwa nanobiopestisida memiliki tingkat toksisitas rendah terhadap organisme non-target, sehingga aman bagi lingkungan dan manusia. Selain itu, pembaruan sosial melalui pemberdayaan petani menjadi kunci penting. Afandi et al. (2024) dan Suhindarno et al. (2025) menekankan bahwa pelatihan petani untuk memproduksi dan menerapkan biopestisida dari bahan lokal memperkuat kemandirian komunitas serta meningkatkan kesadaran lingkungan. Studi ini juga menyoroti nilai spiritual dan ekologis yang tertanam dalam prinsip pertanian organik berbasis komunitas. Adapun bentuk inovasi teknologi dan sosial dalam optimalisasi biopestisida dari artikel yang dikaji disajikan pada Tabel 4.

Kombinasi antara pengetahuan lokal dan inovasi ilmiah juga terlihat dalam penggunaan bahan tradisional seperti jahe dan neem. Siregar et al. (2024) menunjukkan bahwa pestisida berbahan jahe tidak hanya efektif mengatasi *Spodoptera frugiperda*, tetapi juga berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi lokal melalui peluang ekspor produk organik. Gulo & Larosa (2025) juga melaporkan bahwa penggunaan pestisida nabati berbasis sirsak dan rotasi tanaman dapat menjaga keberlanjutan budidaya pisang tanpa mengorbankan produktivitas. Strategi yang menggabungkan teknologi canggih dan pendekatan sosial ini sejalan dengan konsep pembangunan pertanian yang ramah lingkungan. Apabila mengadopsi inovasi yang sesuai secara lokal dan terintegrasi dalam sistem pengendalian hama terpadu, potensi keberhasilan biopestisida dapat ditingkatkan secara signifikan.

Biopestisida sebagai Keseimbangan Ekosistem dan Keberlanjutan

Salah satu keunggulan utama dari biopestisida nabati adalah kemampuannya menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Zuo et al. (2025) membuktikan bahwa penggunaan pestisida botani mampu menekan hama lychee fruit borer lebih dari 80% sambil tetap mempertahankan keanekaragaman hayati arthropoda di kebun. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa pengendalian hama tidak perlu mengorbankan stabilitas ekosistem. Pengendalian hayati menggunakan entomopatogen seperti *Beauveria bassiana* juga menunjukkan dampak positif terhadap ekosistem lokal. Rohmah et al. (2025) dalam studi di Subang membuktikan bahwa penggunaan agensia hayati ini menurunkan populasi hama secara signifikan tanpa menimbulkan kerusakan ekologi. Partisipasi aktif petani dalam perbanyak dan aplikasi menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat diadopsi secara luas di tingkat komunitas.

Jamin et al. (2024) mengingatkan bahwa paparan jangka panjang terhadap pestisida sintetis menyebabkan degradasi lingkungan dan menurunkan keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, pemanfaatan biopestisida bukan sekadar alternatif, melainkan kebutuhan mendesak untuk menyelamatkan sumber daya

tanah, air, dan udara. Hal ini, IPM (*Integrated Pest Management*) menjadi pendekatan strategis. Seperti diuraikan Angon et al. (2023), IPM yang menggabungkan biopestisida, musuh alami, dan pengelolaan habitat dapat meningkatkan efisiensi biaya dan memperpanjang umur produktivitas lahan. Oleh karena itu, sudah jelas bahwa penerapan biopestisida nabati membawa dampak positif tidak hanya dari segi agronomis, tetapi juga dari sisi ekologi dan sosial. Dukungan riset berkelanjutan, kolaborasi antar aktor, serta kebijakan pemerintah yang progresif diperlukan untuk memastikan bahwa biopestisida dapat berfungsi sebagai pilar utama dalam sistem pertanian ramah lingkungan masa depan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa penerapan biopestisida nabati mampu memberikan solusi efektif dalam mengurangi ketergantungan terhadap pestisida sintetis yang berdampak buruk pada kesehatan manusia dan lingkungan. Berbagai formulasi nabati, seperti CGNC (cabai, bawang putih, neem, urin sapi), serta kombinasi dengan mikroorganisme seperti *Beauveria bassiana*, terbukti mampu menurunkan populasi hama secara signifikan tanpa merusak musuh alami atau ekosistem air. Penggunaan teknologi pendukung seperti nanobiopestisida dan pendekatan komunitas juga berkontribusi dalam meningkatkan adopsi dan efektivitas biopestisida di tingkat lapangan. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi biopestisida dalam sistem pertanian ramah lingkungan dapat meningkatkan produktivitas tanaman, melindungi keanekaragaman hayati, dan memperpanjang umur lahan produktif. Penggunaan biopestisida juga mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya dalam bidang kesehatan, ketahanan pangan, dan pengelolaan sumber daya alam. Secara sosial, pendekatan ini mendorong partisipasi petani dan memperkuat kemandirian komunitas melalui pemanfaatan bahan lokal.

Akan tetapi, pengembangan biopestisida masih menghadapi sejumlah kendala. Adapun kendala tersebut yaitu, rendahnya literasi petani terhadap manfaat dan cara pembuatan biopestisida, terbatasnya akses terhadap bahan baku berkualitas dan alat produksi, serta minimnya dukungan riset formulasi yang tahan lama dan efisien secara ekonomi. Selain itu, regulasi dan proses perizinan biopestisida di beberapa negara termasuk Indonesia masih belum sefleksibel pestisida kimia, sehingga memperlambat adopsi komersial. Keterbatasan distribusi, kelemahan dalam sistem pembuktian efektivitas lapangan, serta belum maksimalnya sinergi antara akademisi, pemerintah, dan industri juga menjadi tantangan tersendiri dalam memperluas skala implementasi. Kegiatan tersebut perlu adanya penguatan riset lanjutan yang menguji efektivitas biopestisida di berbagai agroekosistem, termasuk formulasi inovatif berbasis teknologi nano dan mikroba. Pemerintah dan lembaga pendidikan perlu memberikan pelatihan berkelanjutan kepada petani mengenai pembuatan dan aplikasi biopestisida berbasis lokal. Dukungan kebijakan dalam bentuk insentif, regulasi, dan integrasi biopestisida dalam program IPM nasional sangat penting untuk memperluas implementasi pertanian ramah lingkungan di Indonesia dan negara-negara berkembang lainnya.

REFERENSI

- Afandi, A., Mardiyah, S., Ashfaq, A., & Saud, M. (2024). Islamic Eco-Theology in Practice: Revitalizing Environmental Stewardship and Tawhidic Principles in Agricultural Community. *MUHARRIK: Jurnal Dakwah Dan Sosial*, 7(2), 257–282.
- Ananda, Y., Rizal, E., & Rohman, A. S. (2025). Pemetaan pengetahuan terhadap perkembangan penelitian kebutuhan informasi pada database Scopus menggunakan VOSViewer. *Informatio: Journal of Library and Information Science*, 5(1), 49–66. <https://doi.org/10.24198/inf.v5i1.59622>
- Angon, P. B., Mondal, S., Jahan, I., Datto, M., Antu, U. B., Ayshi, F. J., & Islam, Md. S. (2023). Integrated Pest Management (IPM) in Agriculture and Its Role in Maintaining Ecological Balance and Biodiversity. *Advances in Agriculture*, 2023, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2023/5546373>
- Ayilara, M. S., Adeleke, B. S., Akinola, S. A., Fayose, C. A., Adeyemi, U. T., Gbadegesin, L. A., Omole, R. K., Johnson, R. M., Uthman, Q. O., & Babalola, O. O. (2023). Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>
- Bartolini, M., Bottani, E., & Grosse, E. H. (2019). Green warehousing: Systematic literature review and bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 226, 242–258.
- Basaid, K., & Furze, J. N. (2024). Botanical-microbial Synergy—Fundamentals of Untapped Potential of Sustainable Agriculture. *Journal of Crop Health*, 76(6), 1263–1280. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-01008-5>
- Briolat, E. S., Gaston, K. J., Bennie, J., Rosenfeld, E. J., & Troschianko, J. (2021). Artificial nighttime lighting impacts visual ecology links between flowers, pollinators and predators. *Nature Communications*, 12(1), 4163. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24394-0>
- Budi, G. P. (2021). Beberapa Aspek Pengelolaan OPT Ramah Lingkungan, Suatu Upaya Mendukung Pertanian Berkelanjutan. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 2, 31–38. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v2i.163>
- Butu, M., Stef, R., Grozea, I., Corneanu, M., & Butnariu, M. (2020). Biopesticides: Clean and Viable Technology for Healthy Environment. In *Bioremediation and Biotechnology* (pp. 107–151). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_6

- Daraban, G. M., Hlihor, R.-M., & Suteu, D. (2023). Pesticides vs. Biopesticides: From Pest Management to Toxicity and Impacts on the Environment and Human Health. *Toxics*, 11(12), 983. <https://doi.org/10.3390/toxics11120983>
- Fairuz, M., Ridayanti, H., Amirullah, A. A., Khairunnisa, S. P., Triesnabayu, M., Ula, N., & Wachdijono, W. (2024). Pemanfaatan Pestisida Nabati dari Bawang Putih untuk Pertanian di Desa Ciherang. *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat METHABDI*, 4(2), 219–223. <https://doi.org/10.46880/methabdi.Vol4No2.pp219-223>
- Gulo, B. T., & Larosa, Y. M. (2025). Strategi Pengendalian Hama dan Penyakit pada Budidaya Pisang Kepok (*Musa Paradisiaca*, L.) Secara Ramah Lingkungan. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), 202–212. <https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.264>
- Gupta, I., Singh, R., Muthusamy, S., Sharma, M., Grewal, K., Singh, H. P., & Batish, D. R. (2023). Plant Essential Oils as Biopesticides: Applications, Mechanisms, Innovations, and Constraints. *Plants*, 12(16), 2916. <https://doi.org/10.3390/plants12162916>
- Huang, C., Yang, C., Wang, S., Wu, W., Su, J., & Liang, C. (2020). Evolution of topics in education research: a systematic review using bibliometric analysis. *Educational Review*, 72(3), 281–297. <https://doi.org/10.1080/00131911.2019.1566212>
- Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Litrico, I., Malausa, T., Reboud, X., & Huyghe, C. (2022). Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- Jamin, F. S., Kamal, D. M., Auliani, R., Rusli, M., & Pramono, S. A. (2024). Penggunaan pestisida dalam pertanian: Resiko kesehatan dan alternatif ramah lingkungan. *Jurnal Kolaboratif Sains*, 7(11), 4151–4159.
- M, S., C, J., & Raj, T. L. S. (2024). Plant-Derived Pest Control: Molecular, Ecological & Technological Perspectives. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 25(6), 263–277. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2024/v25i6657>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rabbaniyah, A. M., Samara, A., Saloe, D. B., Pane, J. Y. M. P., Ginting, M. L. G., Safitri, M. S., Sabir, M. S., Ingguti, N. I., Ketaren, R. G. M. K., & Sinuraya, R. G. A. S. (2025). Pemanfaatan Pestisida Nabati (Umbi Gadung) sebagai Solusi Ramah Lingkungan untuk Pertanian Berkelanjutan. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Hasanuddin*, 6(1), 24–35.
- Rana, L., Kumar, M., Rajput, J., Kumar, N., Sow, S., Kumar, S., Kumar, A., Singh, S. N., Jha, C. K., Singh, A. K., Ranjan, S., Sahoo, R., Samanta, D., Nath, D., Panday, R., & Raigar, B. L. (2024). Nexus between nanotechnology and agricultural production systems: challenges and future prospects. *Discover Applied Sciences*, 6(11), 555. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06265-7>
- Reddy, D. S., & Chowdary, N. M. (2021). Botanical biopesticide combination concept—a viable option for pest management in organic farming. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00366-w>
- Rohmah, S. N., Putri, D. A., Rinsky, E. V., Adly, M. N., Raadi, A. Z. L., Permana, S. H., Firamadhan, F. A., Karunia, M., Marwiyah, S., & Priyambodo, S. (2025). Perbanyakan Agens Hayati *Beauveria Bassiana* sebagai Biopestisida Ramah Lingkungan di Desa Sukatani, Kecamatan Compreng, Subang. *Jurnal Pusat Inovasi Masyarakat*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.29244/jpim.7.1.1-13>
- Singh, S., Yadav, G. S., Das, A., Das, B., Devi, H. L., Raghuraman, M., & Kumar, A. (2021). Bioefficacy, environmental safety and synergistic impacts of biorational formulations against whitefly, leafhopper and blister beetle in organic okra ecosystem. *The Journal of Agricultural Science*, 159(5–6), 373–384. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000654>
- Siregar, R. S., Bangun, I. H., Saleh, A., Silalahi, M., Apriyanti, I., Kamaludin, M., & Hussein Abogazia, A. (2024). Nexus between nanotechnology and agricultural production systems: challenges and future prospects. *ARPHA Preprints*, 5, e122499. <https://doi.org/10.3897/arphapreprints.e122499>
- Suhindarno, H., Musta'ana, M., Karismah, A. N., & Maghfiroh, I. (2025). Pelatihan Pupuk Organik Cair dan Pestisida Nabati di Desa Tegalkodo. *J-ABDI: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 4(8), 1671–1680.
- Šunjka, D., & Mechora, Š. (2022). An Alternative Source of Biopesticides and Improvement in Their Formulation—Recent Advances. *Plants*, 11(22), 3172. <https://doi.org/10.3390/plants11223172>
- Sutanto, K. D., Nurawan, A., Taufik, I., Surdianto, Y., Sutrisna, N., Rizal, M., Karmawati, E., Soetopo, D., Trisawa, I. M., & Rahardjo, I. B. (2025). Eco-friendly botanical insecticides to control brown leafhoppers and their effects on the predators and aquatic environment. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 11(1), 113–128.
- Zhou, W., Li, M., & Achal, V. (2025). A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100410. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410>
- Zuo, T., Zheng, F., Wang, L., & Xian, J. (2025). Botanical pesticides as sustainable alternatives for managing lychee fruit borer (*Conopomorpha sinensis*): Balancing pest control and biodiversity Conservation. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 28(3), 102430. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2025.102430>