

BIOHERBISIDA BERBASIS EKSTRAK AIR TUMBUHAN DALAM PENGENDALIAN GULMA BERKELANJUTAN : REVIEW STUDI EKSPERIMENTAL

PLANT WATER EXTRACT-BASED BIOHERBICIDES IN SUSTAINABLE WEED CONTROL: A REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES

Edi Susilo^{1)*}, Hesti Pujiwati²⁾, Wismalinda Rita³⁾

¹⁾Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Ratu Samban, Jl. Jenderal Sudirman No. 87 Arga Makmur, Kabupaten Bengkulu Utara, Propinsi Bengkulu, Indonesia

²⁾Program Studi Agroekoteknologi, Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Jl. WR Supratman Kandang Limun Kota Bengkulu, Propinsi Bengkulu, Indonesia

³⁾Program Studi Peternakan, Fakultas Pertanian dan Peternakan, Universitas Muhammadiyah Bengkulu, Jl. Bali, Kampung. Bali, Teluk Segara, Kota Bengkulu, Propinsi Bengkulu, Indonesia

*email: susilo_agr@yahoo.com

ARTICLE HISTORY : Received [18 January 2026] Revised [15 June 2026] Accepted [18 June 2026]

ABSTRAK

Tujuan: Penelitian ini bertujuan mengkaji efektivitas serta potensi bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan sebagai agen pengendali gulma yang ramah lingkungan dan berkelanjutan melalui penghambatan perkecambahan dan pertumbuhan gulma. **Metodologi:** Penelitian ini merupakan Tinjauan Literatur Sistematis (TLS) yang mensintesis hasil studi eksperimental mengenai bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan yang dipublikasikan dalam sepuluh tahun terakhir. Literatur ditelusuri melalui basis data nasional dan internasional, dengan seleksi artikel dilakukan sesuai pedoman PRISMA. **Hasil:** Berbagai penelitian eksperimental dan non-eksperimental menunjukkan bahwa ekstrak air yang berasal dari tanaman budidaya, gulma, tanaman obat, maupun tanaman aromatik memiliki aktivitas bioherbisida yang mampu menghambat perkecambahan, pertumbuhan akar, dan akumulasi biomassa gulma. Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa ekstrak air yang berasal dari berbagai jenis gulma berpotensi digunakan sebagai bioherbisida karena mampu menghambat pertumbuhan gulma sasaran secara efektif. **Temuan:** Secara umum, peningkatan konsentrasi ekstrak menyebabkan peningkatan aktivitas fitotoksik yang ditunjukkan oleh semakin terhambatnya pertumbuhan akar dan tunas gulma. **Kebaruan:** Ulasan ini menyajikan sintesis studi eksperimental mengenai pemanfaatan ekstrak air tumbuhan sebagai bioherbisida yang ramah lingkungan. **Originalitas:** Artikel ini mengintegrasikan informasi tentang sumber alelokimia, mekanisme alelopati, dan faktor penentu efektivitas bioherbisida untuk mendukung pengembangan pengendalian gulma berkelanjutan. **Kesimpulan:** Bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan berpotensi menjadi alternatif pengendalian gulma yang efektif dan ramah lingkungan. Namun, diperlukan standarisasi formulasi dan validasi lapangan untuk meningkatkan efektivitas serta keandalannya. **Jenis Paper :** Tinjauan literatur sistematis.

Kata kunci: allelopati; bioherbisida; ekstrak air tumbuhan; pengendalian gulma; pertanian berkelanjutan.

ABSTRACT

Purpose : This study aims to assess the effectiveness and potential of aqueous plant extract-based bioherbicides as environmentally friendly, sustainable weed control agents by



*inhibiting weed germination and growth. **Methodology:** This study is a Systematic Literature Review (LSR) that synthesizes the results of experimental studies on aqueous plant extract-based bioherbicides published in the last ten years. The literature was searched in national and international databases, and article selection was conducted in accordance with PRISMA guidelines. **Results:** Various experimental and non-experimental studies indicate that aqueous extracts derived from cultivated plants, weeds, medicinal plants, and aromatic plants have bioherbicidal activity that can inhibit germination, root growth, and weed biomass accumulation. Experimental studies indicate that aqueous extracts from various weed types have potential as bioherbicides, effectively inhibiting the growth of target weeds. **Findings:** In general, increasing the concentration of the extract causes an increase in phytotoxic activity as indicated by the increasing inhibition of weed root and shoot growth. **Novelty:** This review synthesizes experimental studies on the use of aqueous plant extracts as environmentally friendly bioherbicides. **Originality:** This article integrates information on allelochemical sources, allelopathic mechanisms, and determinants of bioherbicide effectiveness to support the development of sustainable weed control. **Conclusion:** Bioherbicides based on plant aqueous extracts have the potential to be an effective and environmentally friendly alternative for weed control. However, standardization of formulations and field validation are needed to improve their effectiveness and reliability. **Type of Paper :** Systematic literature review.*

Keywords: *allelopathy; bioherbicide; aquatic plant extract; allelopathy; weed control; sustainable agriculture.*

PENDAHULUAN

Gulma bersaing dengan tanaman budidaya untuk mendapatkan cahaya, air, dan unsur hara, sehingga dapat menurunkan hasil panen (Zhang et al., 2025). Selama beberapa dekade, penggunaan herbisida sintesis telah menjadi metode utama pengendalian gulma. Namun, penggunaan yang berlebihan dan berkelanjutan dapat menyebabkan residu beracun, pencemaran lingkungan, dan bahaya bagi kesehatan. Selain itu, munculnya resistensi gulma dapat menurunkan efisiensi pengendalian dan mendorong peningkatan dosis dan pengembangan formulasi baru yang tidak berkelanjutan (Indarwati et al., 2023).

Bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan memanfaatkan senyawa alelopati untuk menghentikan fotosintesis, perkecambahan, pertumbuhan vegetatif, respirasi, pembelahan sel, dan penyerapan hara dari gulma sasaran. Ini merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan. Potensi bioherbisida yang mendukung penerapan sistem pertanian berkelanjutan dapat berasal dari senyawa alelokimia seperti fenol, flavonoid, alkaloid, dan terpenoid (Kostina-Bednarz et al., 2023; Alanaz et al., 2023). Karena mudah, aman, mudah digunakan, dan efektif dalam mengekstraksi senyawa alelopatik polar dengan dampak lingkungan yang relatif rendah, penggunaan ekstrak air adalah opsi yang menarik. Studi menunjukkan bahwa pada konsentrasi tertentu, ekstrak tumbuhan dan gulma dapat menekan pertumbuhan gulma. Ini mungkin bermanfaat untuk berbagai tanaman budidaya, termasuk tanaman hortikultura.

Namun, informasi tentang spesies sumber alelopati, metode ekstraksi, konsentrasi ideal, dan waktu aplikasi yang efektif masih kurang. Akibatnya, penelitian lebih lanjut diperlukan (Najib et al., 2025). Penelitian eksperimental diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas bioherbisida secara objektif, menemukan spesies dengan potensi alelopati tinggi, menentukan metode ekstraksi dan dosis yang efektif, dan memahami bagaimana bioherbisida berfungsi melalui analisis fitokimia dan fisiologis (Anwar, 2019).

Jumlah bioherbisida komersial yang tersedia masih sangat terbatas, meskipun banyak spesies tumbuhan telah dilaporkan memiliki aktivitas alelopati (Kostina-Bednarz et al., 2023). *Parthenium hysterophorus* adalah salah satu dari beberapa spesies yang menunjukkan aktivitas fitotoksik yang dapat dikembangkan sebagai herbisida alami (Motmainna et al., 2021). Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan. Kajian ini akan melakukannya dengan mengidentifikasi spesies sumber alelopati, metode ekstraksi, konsentrasi yang efektif, dan bagaimana efeknya terhadap morfologi, fisiologi, biomassa, dan mekanisme penghambatan gulma. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan formulasi bioherbisida yang hemat biaya dan mendukung pengelolaan gulma yang berkelanjutan.

METODOLOGI

Strategi Pencarian Literatur

Kajian ini menggunakan metode Tinjauan Literatur Sistematis (TLS) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti eksperimental mengenai efektivitas bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan dalam pengendalian gulma (GH, 2024). Pencarian literatur dilakukan pada basis data Google Scholar, Garuda, Scopus, ScienceDirect, dan IEEE Xplore dengan batasan publikasi sepuluh tahun terakhir guna menjamin relevansi dan keterbaruan informasi (Bahrom et al., 2025). Kata kunci yang digunakan meliputi bioherbisida, ekstrak air, ekstrak tumbuhan, fitotoksisitas, efektivitas, dan pengendalian gulma yang dikombinasikan menggunakan operator Boolean AND, OR, dan NOT untuk meningkatkan ketepatan hasil pencarian (Cruz-Ortiz & Flores-Méndez, 2021). Artikel yang diseleksi harus berbahasa Indonesia atau Inggris, tersedia dalam teks lengkap, dan relevan dengan topik kajian, sedangkan artikel duplikat atau tidak relevan dikeluarkan dari proses seleksi (Gomes et al., 2024). Seleksi dilakukan melalui penyaringan judul dan abstrak, dilanjutkan dengan penelaahan teks lengkap berdasarkan pedoman PRISMA yang mencakup

tahap identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi artikel (Vasileiou et al., 2023).

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kajian ini mencakup studi eksperimental terkontrol pada skala laboratorium, rumah kaca, maupun lapangan yang mengevaluasi efektivitas bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan menggunakan kontrol positif dan/atau negatif (Jahro et al., 2025). Artikel yang dianalisis harus menyajikan data kuantitatif mengenai penghambatan perkecambahan, pertumbuhan, biomassa, mortalitas gulma, atau fitotoksisitas terhadap tanaman budidaya (Zuyina et al., 2025). Sebaliknya, artikel berupa tinjauan naratif, studi observasional, penelitian tanpa rancangan eksperimen terkontrol, tidak menggunakan ekstrak air tumbuhan, atau tidak menyajikan data empiris dikeluarkan dari kajian (Tavares et al., 2023). Studi dengan kelemahan metodologis yang signifikan juga tidak diikutsertakan untuk menjaga kualitas sintesis data (Amelia & Fikri, 2025). Selain itu, penelitian yang berfokus pada herbisida sintetis atau pendekatan rekayasa genetik tidak dimasukkan agar kajian tetap terarah pada bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan (Aremu et al., 2024).

Metode Sintesis dan Analisis Data

Artikel yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis menggunakan sintesis naratif untuk mengidentifikasi, membandingkan, dan mengintegrasikan temuan mengenai efektivitas bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan (Jaswadi et al., 2025). Data dikelompokkan berdasarkan spesies sumber ekstrak, jenis gulma sasaran, konsentrasi dan metode aplikasi, serta kondisi pengujian guna mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas bioherbisida (Cruz-Ortiz & Flores-Méndez, 2021). Analisis juga mempertimbangkan peran alelokimia, dosis, waktu aplikasi, kebutuhan validasi lapangan, dan risiko fitotoksisitas terhadap tanaman budidaya (Nikolić et al., 2023). Hasil sintesis digunakan untuk mengidentifikasi spesies tumbuhan yang berpotensi sebagai sumber bioherbisida, menentukan strategi aplikasi yang efektif, serta merumuskan arah penelitian lanjutan guna mendukung pengembangan bioherbisida yang lebih efektif, terstandarisasi, dan berkelanjutan (Parven et al., 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Berbagai Kelompok Tumbuhan sebagai Sumber Bioherbisida Berbasis Ekstrak Air

Hasil kajian menunjukkan bahwa berbagai kelompok tumbuhan, termasuk gulma, tanaman budidaya, tanaman liar, tanaman aromatik, dan tanaman obat, dapat digunakan

sebagai sumber bioherbisida berbasis ekstrak air. Metode ekstraksi air banyak digunakan karena sederhana, ramah lingkungan, dan efektif dalam mengekstraksi senyawa alelokimia polar. Di sisi lain, komposisi dan konsentrasi senyawa bioaktif yang diperoleh dari metode ekstraksi sangat memengaruhi efektivitas bioherbisida. Perkecambahan dan pertumbuhan gulma lain dapat dihambat oleh sifat alelopati beberapa gulma, seperti *Imperata cylindrica*, *Parthenium hysterophorus*, dan spesies *Chenopodium* (Indarwati et al., 2023). Alelokimia juga dibuat oleh tanaman budidaya, seperti sorgum dan padi, melalui eksudat akar dan residu tanaman. Kedua cara ini berfungsi untuk menekan gulma (Anwar et al., 2021). Selain itu, kirinyuh, babadotan, dan berbagai tanaman obat dan aromatik mengandung fenolik, flavonoid, tanin, dan terpenoid yang berkontribusi pada aktivitas fitotoksik, menunjukkan besarnya potensi sumber bioherbisida alami yang masih dapat dikembangkan (Bashar et al., 2023).

Efektivitas Bioherbisida terhadap Berbagai Jenis Gulma

Meskipun jenis gulma, sumber ekstrak, dan konsentrasi aplikasi memengaruhi tingkat keberhasilan bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan dalam mengendalikan gulma baik daun sempit maupun daun lebar. Konsentrasi ekstrak *Mikania micrantha* meningkat hingga 60%, menekan pertumbuhan *Echinochloa crus-galli* (Alridiwersah et al., 2020). Ekstrak *Chromolaena odorata*, *Sapindus saponaria*, dan *Quillaja lancifolia* pada gulma daun lebar dilaporkan dapat menghentikan tanaman invasif seperti *Amaranthus viridis* dan *Euphorbia serpens* melalui aktivitas alelokimia (GH & Arsal, 2025). Respon gulma juga dipengaruhi oleh siklus hidupnya. Gulma semusim biasanya lebih sensitif terhadap penghambatan perkecambahan, sementara gulma tahunan memerlukan formulasi atau aplikasi yang sering, yang dapat menghambat regenerasi vegetatif (Hasan et al., 2022). Oleh karena itu, evaluasi fitotoksitas terhadap tanaman budidaya masih diperlukan untuk memastikan bahwa penggunaan bioherbisida aman (Azahra et al., 2025).

Efektivitas Bioherbisida terhadap Perkecambahan Gulma

Studi menunjukkan bahwa bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan berfungsi dengan baik untuk menghentikan perkecambahan gulma melalui aktivitas alelopati. Dengan mengganggu proses fisiologis dan metabolisme benih, senyawa alelokimia menurunkan viabilitas benih, menghentikan pertumbuhan awal kecambah, dan menyebabkan anomali morfologis (Indarwati et al., 2023). Dalam beberapa spesies gulma, ekstrak *Imperata cylindrica* dan *Ageratum conyzoides* ditemukan dapat menekan pertumbuhan awal dan perkecambahan secara signifikan. Ini menunjukkan bahwa fase perkecambahan adalah target utama dalam penggunaan bioherbisida untuk mengendalikan gulma (Isda et al., 2013).

Pengaruh bioherbisida terhadap persentase perkecambahan

Salah satu parameter penting untuk mengevaluasi seberapa efektif bioherbisida adalah persentase perkecambahan. Secara umum, penghambatan perkecambahan gulma ditingkatkan dengan meningkatkan konsentrasi ekstrak (Indarwati et al., 2023). Ekstrak *Parthenium hysterophorus* dan *Chromolaena odorata* menunjukkan aktivitas alelopati yang kuat untuk menekan pertumbuhan berbagai spesies gulma. Namun, ekstrak gulma lain berhasil menghambat gulma sasaran tanpa menyebabkan fitotoksisitas yang berlebihan pada tanaman budidaya (Motmainna et al., 2021; Najib et al., 2025). Namun, tidak semua ekstrak menunjukkan reaksi linier karena terjadi hormesis, yaitu konsentrasi rendah berfungsi sebagai stimulan dan konsentrasi tinggi berfungsi sebagai penghambat. Oleh karena itu, menentukan dosis yang paling cocok adalah bagian penting dari pembuatan bioherbisida (Mali et al., 2021).

Pengaruh terhadap kecepatan perkecambahan

Pengaruh bioherbisida terhadap kecepatan perkecambahan biasanya lebih besar daripada pengaruh mereka terhadap persentase perkecambahan. Meskipun alelokimia seringkali berdampak lebih besar pada viabilitas benih, konsentrasi tertentu juga dapat memperlambat munculnya kecambah (Indarwati et al., 2023). Ekstrak *Parthenium hysterophorus* dilaporkan mengganggu respirasi, fotosintesis, dan keseimbangan hormon pertumbuhan. Konsentrasi tinggi dilaporkan menurunkan laju perkecambahan dan pertumbuhan bibit awal (Bashar et al., 2022; Zainuddin et al., 2023). Kemampuan alelokimia selama perkecambahan menghentikan aktivitas enzim, sintesis protein, dan metabolisme. Akibatnya, pertumbuhan radikula, koleoptil, dan biomassa awal kecambah berkurang (Bashar et al., 2023). Eksudat akar, jaringan tanaman, senyawa volatil, dan perkolat memiliki kemampuan untuk melepaskan senyawa alelopati pada tingkat fisiologis dan biokimia (Garzoli et al., 2023).

Variasi respons antarspesies gulma

Karena sensitivitas terhadap jenis dan konsentrasi alelokimia yang berbeda, reaksi gulma terhadap bioherbisida bervariasi antar spesies (Alanaz et al., 2023). Meskipun ekstrak *Alhagi graecorum* dilaporkan memiliki kemampuan untuk menghentikan perkecambahan, pertumbuhan kecambah distimulasi ketika digunakan pada konsentrasi rendah, menunjukkan bahwa respons bergantung pada dosis (Mansour et al., 2014). Ekstrak alang-alang juga memiliki pola serupa, yang berbeda dengan spesies target (Susilo et al., 2024). Selain itu, beberapa ekstrak menunjukkan preferensi yang tinggi terhadap jenis gulma tertentu. Misalnya, ekstrak daun cengkeh memiliki kemampuan untuk menekan pertumbuhan dan biomassa

gulma secara signifikan, sedangkan senyawa ailantona dari *Ailanthus altissima* dan ekstrak tembakau menunjukkan aktivitas alelopati yang tinggi, yang memungkinkan pengembangan mereka sebagai bioherbisida (Amrullah et al., 2024).

Secara keseluruhan, bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan menekan perkecambahan gulma dengan baik. Mereka menghentikan persentase dan kecepatan perkecambahan serta menghentikan pertumbuhan awal kecambah. Sumber ekstrak, konsentrasi aplikasi, komposisi alelokimia, dan sensitivitas spesies gulma sasaran adalah semua faktor yang memengaruhi tingkat efektivitasnya (Alanaz et al., 2023).

Efektivitas Bioherbisida terhadap Pertumbuhan Vegetatif Gulma

Bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan juga menghambat perkecambahan gulma dengan menghentikan pertumbuhan akar, tunas, dan akumulasi biomassa. Aktivitas alelokimia mengganggu proses fisiologis dan metabolisme penting, yang mengurangi daya saing gulma terhadap tanaman budidaya.

Pengaruh terhadap pertumbuhan akar

Salah satu organ yang paling rentan terhadap alelokimia adalah akar. Menurut beberapa penelitian, ekstrak air tumbuhan menghentikan pemanjangan akar dengan menghentikan pembelahan sel, sintesis protein, dan penyerapan air dan unsur hara (Alridiwersah et al., 2020). Misalnya, ekstrak daun cengkeh memiliki kemampuan untuk menurunkan panjang akar dan biomassa gulma karena aktivitas fitotoksik flavonoid, saponin, dan tanin. Ini menyebabkan biomassa tidak seimbang di antara tajuk dan akar, dan gulma menjadi tidak kompetitif (Talahatu & Papilaya, 2015; Sudhana et al., 2018). Tingkat penghambatan dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis ekstrak, metode ekstraksi, dan konsentrasi yang digunakan. *Chromolaena odorata* dan ekstrak daun cengkeh memiliki efek yang lebih besar pada konsentrasi tertentu dibandingkan dengan dosis rendah. Oleh karena itu, karakterisasi fitokimia diperlukan untuk menemukan bahan yang berpartisipasi dalam proses penghambatan akar (Syafira et al., 2025).

Pengaruh terhadap pertumbuhan tunas

Selain itu, bioherbisida menghambat pertumbuhan tunas dengan mengganggu fotosintesis, respirasi, sintesis protein, dan keseimbangan hormon pertumbuhan. Akibatnya, tanaman mengalami penurunan tinggi, luas daun, dan biomassa tajuk (Indriani et al., 2024). Diketahui bahwa beberapa alelokimia merusak membran sel, menghentikan aktivitas enzim, mengurangi pembentukan klorofil, dan menghentikan aktivitas Rubisco, yang bertanggung jawab atas fiksasi karbon (Alanaz et al., 2023). Pembentukan biomassa tajuk berkurang

sebagai akibat dari penurunan kapasitas fotosintesis. Konsentrasi ekstrak biasanya meningkat seiring dengan penurunan ini, dan konsentrasi 20 hingga 50% dilaporkan menghasilkan penghambatan pertumbuhan yang lebih besar daripada dosis rendah (Talahatu & Papilaya, 2015). Selain itu, ekstrak batang tembakau menunjukkan potensi bioherbisida melalui berbagai mekanisme fisiologis yang menghalangi pertumbuhan gulma. Sebaliknya, senyawa fenolik dari bandotan dapat menghambat aktivitas sitokinin, menghentikan pembelahan dan pembesaran sel daun (Cahyati et al., 2022).

Pengaruh terhadap biomassa gulma

Salah satu indikator utama keberhasilan bioherbisida adalah penurunan biomassa. Dengan menghentikan fotosintesis, metabolisme energi, penyerapan air, dan distribusi nutrisi, senyawa alelokimia mengurangi akumulasi bahan organik pada gulma. Penurunan biomassa kering menunjukkan penghalang pertumbuhan yang lebih permanen, sementara penurunan biomassa segar menunjukkan penurunan penyerapan air. Dilaporkan bahwa ekstrak *Ageratum conyzoides* mengganggu fotosintesis dan penyerapan air, menurunkan berat gulma basah dan kering secara signifikan (Cahyati et al., 2022). Kelompok alelokimia yang paling sering dikaitkan dengan penurunan biomassa adalah flavonoid, fenolik, alkaloid, dan tanin. Ini karena mereka memiliki kemampuan untuk menghentikan pembentukan protein, aktivitas hormon pertumbuhan, respirasi sel, transportasi ion, dan aktivitas enzim yang mendukung pertumbuhan tanaman (Indarwati et al., 2023).

Secara umum, penurunan biomassa yang lebih besar diikuti oleh peningkatan konsentrasi ekstrak, menunjukkan bahwa dosis aplikasi dan kandungan alelokimia sangat memengaruhi kinerja bioherbisida. Hasil ini menegaskan bahwa bioherbisida yang berasal dari ekstrak air tumbuhan dapat digunakan sebagai alternatif pengendalian gulma yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Indarwati et al., 2023).

Mekanisme Inhibisi Pertumbuhan Gulma

Menurut beberapa penelitian, bioherbisida yang berasal dari ekstrak air tumbuhan menghambat pertumbuhan gulma melalui mekanisme alelopati. Sebagian besar senyawa alelokimia, termasuk fenol, flavonoid, alkaloid, terpenoid, dan kuinon, mengganggu permeabilitas membran, penyerapan ion, fotosintesis, aktivitas enzim, dan respirasi. Sorgoleone, misalnya, menghambat penyerapan ion dan menyebabkan stres air, dan asam ferulat dan asam p-hidroksibenzoat mengurangi efisiensi fotosistem II (Najib et al., 2025). Penurunan status air sel, penutupan stomata, dan penurunan difusi CO₂ disebabkan oleh

masalah penyerapan air. Akibatnya, laju fotosintesis menurun dan pertumbuhan gulma terhambat (Kostina-Bednarz et al., 2023). Oleh karena itu, mekanisme fisiologis yang saling berkaitan memungkinkan bioherbisida memiliki efek fitotoksik (Anwar et al., 2023).

Indikasi mekanisme alelopatik

Alelokimia memiliki kemampuan untuk mengganggu fungsi membran plasma, penyerapan air dan hara, dan sintesis hormon pertumbuhan. Semua ini menunjukkan aktivitas alelopati (Septiani et al., 2019). Dilaporkan bahwa senyawa fenolik dalam ekstrak *Ageratum conyzoides* menghambat pembelahan sel akar melalui kerusakan membran dan gangguan aktivitas sitokinin. Di sisi lain, penurunan aktivitas IAA dan giberelin menghambat pertumbuhan akar dan tunas (Cahyati et al., 2022; Septiani et al., 2019). Penurunan kandungan klorofil dan karotenoid adalah salah satu indikator utama stres alelopatik. Ini terjadi karena biosintesis pigmen fotosintetik terganggu, kerusakan struktur kloroplas, dan penurunan efisiensi fotosintesis, yang mengakibatkan penurunan pertumbuhan dan biomassa gulma (Hua et al., 2023). Selain itu, penghambatan enzim pada siklus Calvin dan rantai transpor elektron mengurangi produksi energi dan fiksasi karbon.

Efek biokimia dan seluler

Alelokimia menyebabkan akumulasi reaktif oksigen spesies (ROS) pada tingkat seluler, yang menyebabkan stres oksidatif, peroksidasi lipid, kerusakan protein, dan gangguan fungsi organel. Selain itu, peningkatan ROS menekan sistem antioksidan tanaman, yang dapat menyebabkan kerusakan sel yang lebih parah dan kematian sel terprogram (Hua et al., 2023). Selanjutnya, stres oksidatif mengganggu rantai transpor elektron pada kloroplas dan mitokondria. Akibatnya, produksi FAD, ATP, dan NADPH berkurang, yang masing-masing sangat penting untuk metabolisme sel (Kostina-Bednarz et al., 2023). Selain itu, bukti eksperimental menunjukkan bahwa bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan menghambat pertumbuhan gulma melalui gangguan fisiokimia. Peningkatan permeabilitas membran menyebabkan hilangnya homeostasis ion dan peningkatan kadar malondialdehid sebagai indikator kerusakan membran. Pada akhirnya, ini mempercepat degradasi klorofil, mengurangi kapasitas fotosintesis, dan meningkatkan efek fitotoksik bioherbisida terhadap gulma (Alghanem, 2025).

Perbandingan dengan Herbisida Sintetis

Bioherbisida yang berasal dari ekstrak air tumbuhan telah terbukti memiliki kemampuan untuk mengendalikan gulma melalui mekanisme alelopati dan fitotoksisitas. Namun, keefektifan bioherbisida ini dipengaruhi oleh sumber ekstrak, formulasi, dan kondisi

aplikasinya. Bioherbisida menawarkan keunggulan, termasuk kurangnya polusi lingkungan, penurunan degradasi tanah, dan resistensi gulma yang lebih rendah, yang membuatnya lebih mudah untuk digunakan.

Tingkat efektivitas relatif

Akibat konsentrasi bahan aktif yang rendah, volatilitas senyawa, dan keterbatasan stabilitas formulasi, bioherbisida masih bervariasi dan efektif dalam beberapa kondisi lebih rendah daripada herbisida sintetis. Namun, produk seperti WeedLock dapat mengendalikan gulma hingga 98,15% tanpa mengganggu aktivitas biologis tanah (Hasan et al., 2022). Stabilitas, bioavailabilitas, dan efikasi bioherbisida dapat ditingkatkan melalui pengembangan teknologi formulasi seperti fitosom dan nanoteknologi (Indriani et al., 2024). Selain itu, kemungkinan resistensi gulma dapat dikurangi oleh keanekaragaman mekanisme kerja alelokimia. Namun, respons pengendalian cenderung lebih lambat dan dipengaruhi oleh berbagai bahan baku, teknik ekstraksi, dan kondisi lingkungan (Mudaningrat et al., 2023).

Selektivitas dan keamanan terhadap tanaman budidaya

Bioherbisida memiliki keunggulan utama karena lebih selektif terhadap gulma sasaran dan berdampak lebih sedikit pada organisme lain dan lingkungan (Atmiyati & Hermawati, 2025). Ini memiliki potensi untuk mengurangi pencemaran tanah dan air serta mendukung penerapan Pengendalian Gulma Terpadu dalam sistem pertanian yang berkelanjutan (Anwar & Qureshi, 2022). Namun demikian, risiko fitotoksitas tanaman budidaya masih perlu dievaluasi melalui pengujian pada berbagai kultivar dan kondisi lingkungan untuk memastikan bahwa aplikasinya aman dan efektif di lapangan (Briones-Rizo et al., 2023).

Tantangan konsistensi dan validasi lapangan

Tantangan utama dalam pengembangan bioherbisida masih konsistensi efektivitas. Variasi genetik tanaman sumber, kandungan metabolit sekunder, teknik ekstraksi, dan faktor lingkungan dapat mengubah aktivitas antara batch produksi dan batch penelitian (Kostina-Bednarz et al., 2023). Interaksi senyawa aktif dengan mikroorganisme dan tanah juga dapat mempengaruhi degradasi dan bioavailabilitasnya. Sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium dan rumah kaca, jadi mereka belum sepenuhnya menggambarkan kondisi lapangan yang lebih kompleks (Rajakumar et al., 2025). Oleh karena itu, untuk meningkatkan validitas dan stabilitas penerapan bioherbisida, diperlukan standardisasi bahan baku, formulasi, metode produksi, waktu aplikasi, dan uji lapangan jangka panjang.

Batasan Studi Eksperimental

Beberapa bukti menunjukkan bahwa bioherbisida yang dibuat dari ekstrak air tumbuhan dapat membantu mengendalikan gulma. Namun, belum ada bukti mengenai

keamanan tanaman budidaya, efektivitas produk komersial, dan selektivitas terhadap gulma sasaran (Hasan et al., 2021). Selain itu, kemungkinan keanekaragaman hayati sebagai sumber bioherbisida belum dimanfaatkan sepenuhnya karena sebagian besar penelitian hanya mengevaluasi sejumlah kecil spesies tumbuhan. Di sisi lain, kekurangan informasi tentang profil alelokimia dan senyawa aktif terus menghambat pengembangan produk yang konsisten dan memiliki mekanisme kerja yang jelas (Jahro et al., 2025; Anwar et al., 2021).

Kajian mengenai mekanisme aksi alelopati, target fisiologis, dan dampak ekotoksikologis masih sangat terbatas. Akibatnya, penelitian yang ada biasanya berkonsentrasi pada pengujian efektivitas (Kostina-Bednarz et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan yang fokus pada isolasi dan identifikasi alelokimia, karakterisasi senyawa aktif, dan analisis mekanisme fitotoksisitas dengan menggunakan metode fitokimia kontemporer (Syafira et al., 2025).

Selain itu, dominasi penelitian pada skala laboratorium dan rumah kaca merupakan kendala lainnya. Untuk memastikan bahwa bioherbisida tetap stabil dan efektif di lapangan, validasi harus dilakukan pada berbagai sistem budidaya dan kondisi lapangan. Ini karena faktor lingkungan, interaksi biotik, dan kompleksitas agroekosistem memengaruhi hasil yang diperoleh pada kondisi terkontrol (Hernández-Bolaños et al., 2025).

Risiko fitotoksisitas terhadap tanaman budidaya, ketidakstabilan efek penghambatan, dan variasi respons yang disebabkan oleh perubahan kondisi lingkungan adalah beberapa kendala yang masih terkait dengan penerapan bioherbisida (Khamare et al., 2022). Di samping itu, evaluasi jangka panjang diperlukan karena kurangnya informasi tentang efeknya terhadap organisme non-target, mikrobioma tanah, keanekaragaman hayati, dan fungsi ekosistem pertanian (Rajakumar et al., 2025).

Tidak adanya standarisasi pada metode ekstraksi, formulasi, aplikasi, dan prosedur pengujian juga menyebabkan hasil penelitian yang sangat berbeda satu sama lain. Akibatnya, reproduksibilitas dan perbandingan data menjadi lebih sulit (Islam et al., 2018). Selain itu, variasi komposisi fitokimia yang beragam, keterbatasan bahan baku, biaya produksi yang tinggi, stabilitas produk yang rendah, rendahnya kandungan bahan aktif, dan persyaratan regulasi yang kompleks adalah masalah lain yang menghalangi pengembangan produk komersial. Karena banyak senyawa alelokimia mudah rusak oleh faktor lingkungan, stabilitas formulasi sangat penting. Ini karena efektivitasnya menurun baik selama penyimpanan maupun aplikasi. Oleh karena itu, stabilitas, masa simpan, dan efikasi bioherbisida dapat ditingkatkan melalui pengembangan teknologi formulasi seperti enkapsulasi dan sistem

pelepasan terkendali (Zhang et al., 2025).

Secara keseluruhan, kendala penelitian saat ini termasuk identifikasi senyawa aktif yang terbatas, pemahaman yang buruk tentang mekanisme aksi, kurangnya validasi lapangan, rendahnya standarisasi metode, dan sedikit informasi tentang dampak ekologis jangka panjang. Untuk meningkatkan pemanfaatan bioherbisida sebagai alternatif pengendalian gulma yang aman dan efisien, penelitian mendatang harus berkonsentrasi pada penemuan target molekuler alelokimia, pengembangan formulasi yang lebih stabil, dan pengujian lapangan jangka panjang pada berbagai agroekosistem. (Duke et al., 2022).

Implikasi dan Arah Penelitian Masa Depan

Sebagai alternatif untuk herbisida sintetis dalam pengendalian gulma, bioherbisida yang dibuat dari ekstrak air tumbuhan tampaknya memiliki potensi yang besar. Studi-studi ini menunjukkan bahwa metode ini lebih ramah lingkungan. Namun, untuk menerapkannya secara luas, diperlukan lebih banyak bukti tentang mekanisme fitotoksisitas, efektivitas, stabilitas formulasi, selektivitas, dan konsistensi kinerja di lapangan. Selain itu, konsentrasi, waktu aplikasi, dan kesesuaian dengan kondisi agroekosistem juga perlu diperkuat (Lopes et al., 2022; Nikolić et al., 2023).

Implikasi bagi pengembangan bioherbisida

Bioherbisida yang dibuat dari ekstrak air tumbuhan memiliki potensi besar untuk menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk pengendalian gulma. Menggunakannya dapat mengurangi risiko pencemaran lingkungan dan efek buruk terhadap kesehatan serta mencegah resistensi gulma yang meningkat sebagai akibat dari penggunaan herbisida kimia berlebihan (Cahyati et al., 2022). Untuk digunakan, bioherbisida harus dikembangkan dengan mempertimbangkan efektivitas dan selektivitas terhadap gulma sasaran. Selain itu, mereka harus dimasukkan ke dalam sistem pengendalian gulma terpadu bersama dengan metode mekanis, kultur teknis, dan agronomis lainnya. Selain itu, untuk adopsi teknologi ini berhasil, penyuluhan, pelatihan, dan diseminasi informasi ilmiah harus diberikan kepada petani (Najib et al., 2025; Atmiyati & Hermawati, 2025).

Bioherbisida memungkinkan pemanfaatan sumber daya hayati lokal, terutama tumbuhan alelopatik yang kaya akan senyawa bioaktif, sehingga menghasilkan produk inovatif dan bernilai ekonomi tinggi (Chukwuma et al., 2024). Selain itu, mereka meningkatkan ketahanan agroekosistem dan keberlanjutan sistem pertanian (Atmiyati & Hermawati, 2024).

Penelitian harus berkonsentrasi pada identifikasi dan karakterisasi bahan aktif, pembuatan formulasi yang lebih stabil, pengujian lapangan dalam berbagai kondisi

agroekosistem, dan evaluasi keamanan terhadap organisme non-target dan lingkungan. Pengembangan bioherbisida yang lebih efisien, aman, terstandarisasi, dan siap diterapkan secara luas dalam praktik pertanian berkelanjutan akan dipercepat dengan dukungan analisis fitokimia, teknik kromatografi, dan karakterisasi molekuler (Syafira et al., 2025).

Optimalisasi formulasi dan aplikasi

Jenis ekstrak, konsentrasi, teknik aplikasi, dan kondisi lingkungan sangat memengaruhi kinerja bioherbisida (Indarwati et al., 2023). Oleh karena itu, formulasi yang stabil, mudah digunakan, dan kompatibel dengan sistem pertanian berkelanjutan harus menjadi prioritas utama. Potensi untuk menggabungkan bioherbisida dengan input organik lainnya dapat meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi sistem budidaya (Azahra et al., 2025).

Kebutuhan riset senyawa aktif dan mekanisme aksi

Penelitian yang akan datang harus berkonsentrasi pada identifikasi dan isolasi senyawa alelokimia sebagai bahan aktif bioherbisida, serta mendapatkan pemahaman lebih lanjut tentang mekanisme molekuler dasar alelopati (Anwar et al., 2021). Selain itu, penelitian tentang interaksi sinergis antar senyawa alelokimia sangat penting karena dapat meningkatkan aktivitas fitotoksik jika dibandingkan dengan penggunaan senyawa tunggal. Untuk mendukung produksi bioherbisida dalam skala besar, juga diperlukan pengembangan metode ekstraksi yang efisien, ekonomis, dan berkelanjutan (Indriani et al., 2024; Ammar et al., 2023).

Kebutuhan uji lapangan dan validasi agroekosistem

Uji lapangan yang lebih luas diperlukan pada berbagai agroekosistem untuk mengevaluasi efektivitas, stabilitas, dan konsistensi bioherbisida dalam kondisi nyata. Ini diperlukan karena sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium dan rumah kaca. Penelitian juga perlu mengkaji durasi efektifitas, potensi adaptasi gulma, dan integrasi bioherbisida dengan rotasi tanaman, tanaman penutup, dan spesies alelopatik lainnya dalam sistem pengendalian gulma.

Evaluasi keamanan dan dampak lingkungan

Keamanan harus menjadi prioritas utama saat mengevaluasi efek bioherbisida terhadap makhluk non-target, seperti mikroorganisme tanah, serangga penyerbuk, dan organisme berguna lainnya. Selain itu, penelitian tentang residu bioherbisida dalam rantai makanan dan bagaimana mereka berdampak pada kesehatan manusia perlu ditingkatkan.

Untuk menilai dampak lingkungan bioherbisida dari produksi hingga penerapan di lapangan, pendekatan life cycle assessment juga penting (Parven et al., 2024).

KESIMPULAN

Bioherbisida berbasis ekstrak air tumbuhan dianggap sebagai alternatif yang kuat untuk pengendalian gulma yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, menurut hasil dari berbagai studi eksperimental. Melalui aktivitas alelopati, berbagai ekstrak tumbuhan terbukti dapat menghentikan perkecambahan, pertumbuhan akar dan tajuk, serta akumulasi biomassa gulma. Jenis tumbuhan sumber, komposisi alelokimia, konsentrasi, metode aplikasi, dan karakteristik gulma sasaran memengaruhi kinerja bioherbisida. Bioherbisida memiliki beberapa keunggulan dibandingkan herbisida sintetis, seperti risiko pencemaran lingkungan yang lebih rendah, resistensi gulma yang lebih rendah, dan kompatibilitas yang lebih baik dengan sistem pertanian berkelanjutan.

Variasi kandungan senyawa aktif, stabilitas formulasi, konsistensi efektivitas, dan keterbatasan validasi lapangan adalah beberapa tantangan yang masih ada saat menggunakan bioherbisida. Oleh karena itu, identifikasi dan karakterisasi bahan alelokimia aktif, pembuatan formulasi yang lebih stabil, dan uji lapangan jangka panjang untuk mengevaluasi efisiensi, selektivitas, dan keamanan lingkungan adalah fokus penelitian selanjutnya. Salah satu tujuan dari upaya ini adalah untuk meningkatkan peran bioherbisida sebagai elemen penting dalam pengelolaan gulma yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Ratu Samban yang telah memotivasi dan memfasilitasi kegiatan penulisan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh tim penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- Alanaz, A. R., Alatawi, E. A. S., Alotaibi, R. S., Alatawi, E. A. H., Albalawi, A. D., Alhumayri, H. A., Alatawi, Q. S., & Alharbi, B. M. (2023). The bio-herbicidal potential of some wild plants with allelopathic effects from Tabuk Region on selected local weed species. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1286105. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1286105>
- Alghanem, S. M. S. (2025). Allelopathic effects of *Aizoon canariense* leaf leachates on growth, biochemistry, and oxidative stress responses in selected crop species.

- Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1659978.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1659978>
- Alridiwersah, A., Tampubolon, K., Sihombing, F. N., Barus, W. A., Syofia, I., Zulkifli, T. B. H., & Purba, Z. (2020). Skrining dan efektivitas metabolit sekunder *Mikania micrantha* pada gulma jajagoan serta dampaknya terhadap padi sawah. *Agrotechnology Research Journal*, 4(2), 84–91.
<https://doi.org/10.20961/agrotechresj.v4i2.44976>
- Amelia, A., & Fikri, A. N. (2025). Rekonstruksi pemenuhan hak-hak anak dalam syariat Islam: Analisis kritis terhadap implementasinya dalam pendidikan Islam kontemporer. *LEARNING: Jurnal Inovasi Penelitian Pendidikan dan Pembelajaran*, 5(4), 1944–1955.
<https://doi.org/10.51878/learning.v5i4.7498>
- Amrullah, R., Indarwati, I., & Susilo, A. (2024). Allelopathy test of *Cyperus rotundus* extract on germination and early growth of spiny amaranth weed (*Amaranthus spinosus*). *Journal of Applied Plant Technology*, 3(2), 137–145. <https://doi.org/10.30742/6zjn2m95>
- Anwar, S., Naseem, S., & Ali, Z. (2023). Biochemical analysis, photosynthetic gene (*psbA*) down-regulation, and in silico receptor prediction in weeds in response to exogenous application of phenolic acids and their analogs. *PLoS ONE*, 18(3), e0277146.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277146>
- Anwar, S., Naseem, S., Karimi, S., Asi, M. R., Akrem, A., & Ali, Z. (2021). Bioherbicidal activity and metabolic profiling of potent allelopathic plant fractions against major weeds of wheat—Way forward to lower the risk of synthetic herbicides. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 632390. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.632390>
- Anwar, T. (2019). Evaluation of phytotoxic potential of selected plants against weeds. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(6), 12683–12696.
https://doi.org/10.15666/aeer/1706_1268312696
- Aremu, A. O., Omogbene, T. O., Fadiji, T., Lawal, I. O., Opara, U. L., & Fawole, O. A. (2024). Plants as an alternative to the use of chemicals for crop protection against biotic threats: Trends and future perspectives. *European Journal of Plant Pathology*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1007/s10658-024-02924-y>
- Atmiyati, S. U., & Hermawati, I. (2025). Efektivitas program penyuluhan pertanian dalam mendorong praktik pertanian berwawasan lingkungan: Studi kasus di Kecamatan Sawangan, Kabupaten Magelang. *SOCIAL: Jurnal Inovasi Pendidikan IPS*, 5(3), 1119–1130.
<https://doi.org/10.51878/social.v5i3.6930>
- Azahra, R., Humaira, Jumaini, Juliana, Wannira, A., & Sopar. (2025). [Data artikel belum lengkap]. *Cendekia: Jurnal Ilmu Pengetahuan*, 5(3).
- Bahrom, B., Pahrudin, A., & Rahmi, S. (2025). *Model, konsep, desain, pendekatan dan model pengembangan kurikulum*. [Informasi penerbit belum tersedia].
- Bashar, H. M. K., Juraimi, A. S., Ahmad-Hamdani, M. S., Uddin, M. K., Asib, N., Anwar, M. P., Rahaman, F., Haque, M. A., & Hossain, A. (2022). Evaluating the phytotoxicity of methanolic extracts of *Parthenium hysterophorus* L. on selected crops and weeds. *bioRxiv*.
<https://doi.org/10.1101/2022.01.21.477310>

- Briones-Rizo, M., Corona, M. E. P., & Medina-Villar, S. (2023). The other way around: The utility of a plant invader. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38, e2. <https://doi.org/10.1017/S1742170523000017>
- Cahyati, N., Sutanto, A., & Widowati, H. (2022). Pengaruh campuran ekstrak *Imperata cylindrica* dan *Ageratum conyzoides* terhadap gulma dan pertumbuhan *Allium fistulosum*. *Bioedukasi: Jurnal Pendidikan Biologi*, 13(1), 82–91. <https://doi.org/10.24127/bioedukasi.v13i1.5307>
- Chukwuma, O. C., Tan, S. P., Hughes, H., McLoughlin, P., O'Toole, N., & McCarthy, N. (2024). Seaweeds as a natural source for bioherbicide development. *Weed Science*, 72(3), 216–228. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.1>
- Cruz-Ortiz, L., & Flores-Méndez, M. (2021). Avances en el desarrollo de nuevos herbicidas biológicos a partir de extractos vegetales fitotóxicos aplicados *in vitro*. *Informador Técnico*, 86(1), 1–14. <https://doi.org/10.23850/22565035.3648>
- Duke, S. O., Pan, Z., Bajsa-Hirschel, J., & Boyette, C. D. (2022). The potential future roles of natural compounds and microbial bioherbicides in weed management in crops. *Advances in Weed Science*, 40, e020220075. <https://doi.org/10.51694/advweedsci/2022;40:seventy-five003>
- Garzoli, S., Vaglia, V., Iriti, M., & Vitalini, S. (2023). Vapor and liquid phase profiles of essential oils from *Abies*, *Picea*, and *Pinus* species and their phytotoxic interactions with weed growth. *Plants*, 12(5), 1172. <https://doi.org/10.3390/plants12051172>
- GH, M. (2024). Analisis penggunaan e-modul pada mata kuliah ekologi: Literatur review.
- GH, M., Sartika, A. D., Musawira, Khalidatunnisa, B., & Sa'diyah, J. (2025). [Judul artikel belum tersedia]. *SCIENCE: Jurnal Inovasi Pendidikan Matematika dan IPA*, 5(2).
- Gomes, A. L. B., Fernandes, A. M. da R., Horta, B. A. C., & Oliveira, M. F. de. (2024). Machine learning algorithms applied to weed management in integrated crop–livestock systems: A systematic literature review. *Advances in Weed Science*, 42, 00004. <https://doi.org/10.51694/advweedsci/2024;42:00004>
- Hasan, M., Ahmad-Hamdani, M. S., Rosli, A. M., & Hamdan, H. (2021). Bioherbicides: An eco-friendly tool for sustainable weed management. *Plants*, 10(6), 1212. <https://doi.org/10.3390/plants10061212>
- Hasan, M., Mokhtar, A. S., Berahim, Z., Rosli, A. M., Hamdan, H., Motmainna, M., & Ahmad-Hamdani, M. S. (2022). Physiological and biochemical responses of selected weed and crop species to the plant-based bioherbicide WeedLock. *Scientific Reports*, 12(1), 24144. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24144-2>
- Hua, Z., He, M., Li, Y., Xie, Q., Wang, Y., Wu, H., & Zhang, Z. (2023). Effects of ¹³C isotope-labeled allelochemicals on the growth of the invasive plant *Alternanthera philoxeroides*. *Scientific Reports*, 13(1), 39889. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39889-7>
- Indarwati, I., Jili, A. Q. A., Susilo, A., & Suryaningsih, D. R. (2023). Potensi alelopati ekstrak gulma alang-alang sebagai bioherbisida. *Journal of Applied Plant Technology*, 2(1), 30–37. <https://doi.org/10.30742/japt.v2i1.77>
- Indriani, R., Sendra, E., & Firdayanti, I. (2024). Hubungan fortifikasi *Moringa oleifera* dalam meningkatkan imunitas anggota keluarga dengan riwayat kanker: Literatur review. *HEALTHY: Jurnal Inovasi Riset Ilmu Kesehatan*, 3(2), 100–109. <https://doi.org/10.51878/healthy.v3i2.3251>

- Isda, M. N., Fatonah, S., & Fitri, R. (2013). Potensi ekstrak daun gulma babadotan (*Ageratum conyzoides* L.) terhadap perkecambahan dan pertumbuhan *Paspalum conjugatum*. *Kauniah: Jurnal Biologi*, 6(2), 1–8. <https://doi.org/10.15408/kauniah.v6i2.2752>
- Islam, A. K. M. M., Yeasmin, S., Qasem, J. R., Juraimi, A. S., & Anwar, M. P. (2018). Allelopathy of medicinal plants: Current status and future prospects in weed management. *Agricultural Sciences*, 9(12), 1569–1588. <https://doi.org/10.4236/as.2018.912110>
- Jahro, I. S., Simanullang, S., Hutagalung, T. P., Simanjuntak, P., Sati, N., Pratama, M. R., & Daeli, D. (2025). Analisis kandungan elektrolit dan non-elektrolit pada tanaman obat keluarga (TOGA). *SCIENCE: Jurnal Inovasi Pendidikan Matematika dan IPA*, 5(1), 224–233. <https://doi.org/10.51878/science.v5i1.4524>
- Khamare, Y., Chen, J., & Marble, C. (2022). Allelopathy and its application as a weed management tool: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1034649. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649>
- Kostina-Bednarz, M., Płonka, J., & Barchańska, H. (2023). Allelopathy as a source of bioherbicides: Challenges and prospects for sustainable agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 471–493. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09656-1>
- Lopes, R. W. N., Morais, E. M., Lacerda, J. J. de J., & Araújo, F. D. da S. (2022). Bioherbicidal potential of plant species with allelopathic effects on the weed *Bidens bipinnata* L. *Scientific Reports*, 12(1), Article 16203. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16203-5>
- Mansour, S. A., Khafagi, O. M., Mossa, A. H., & El-Sanhoury, R. (2014). Allelopathic effects of some botanical extracts compared to atrazine on weed germination. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, H. Botany*, 5(1), 21–33. <https://doi.org/10.21608/eajbsh.2014.16826>
- Motmainna, M., Juraimi, A. S., Uddin, M. K., Asib, N., Islam, A. K. M. M., Ahmad-Hamdani, M. S., & Hasan, M. (2021). Phytochemical constituents and allelopathic potential of *Parthenium hysterophorus* L. in comparison to commercial herbicides to control weeds. *Plants*, 10(7), 1445. <https://doi.org/10.3390/plants10071445>
- Mudaningrat, A., Indriani, B. S., Istianah, N., Retnoningsih, A., & Rahayu, E. S. (2023). Literature review: Pemanfaatan jenis-jenis *Syzygium* di Indonesia. *Jurnal Biologi dan Pembelajarannya (JB&P)*, 10(2), 135–145. <https://doi.org/10.29407/jbp.v10i2.20815>
- Najib, A., Budi, G. P., Pribadi, T., & Hajoeningtjas, O. D. (2025). Uji beberapa jenis ekstrak gulma sebagai herbisida nabati terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman terong (*Solanum melongena* L.) pada kombinasi penyiangan gulma yang berbeda. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 8, 149–156. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v8i.1488>
- Nikolić, L., Šeremešić, S., Džigurski, D., Vojnov, B., & Vasiljević, M. (2023). Weeds as bioindicators of ecological conditions in organic carrot and onion crop. *Contemporary Agriculture*, 72(3), 89–98. <https://doi.org/10.2478/contagri-2023-0012>
- Parven, A., Meftaul, I. M., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2024). Herbicides in modern sustainable agriculture: Environmental fate, ecological implications, and human health concerns. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y>



- Rajakumar, D., Gomathy, M., & Sabarinathan, K. G. (2025). Microbial allelopathy: A review on ecofriendly and sustainable weed management strategy. *Applied Ecology and Environmental Research*, 23(1), 621–635. https://doi.org/10.15666/aeer/2301_621635
- Septiani, D., Hastuti, E. D., & Darmanti, S. (2019). Efek alelokimia ekstrak daun babandotan (*Ageratum conyzoides* L.) terhadap kandungan pigmen fotosintetik dan pertumbuhan gulma rumput belulang (*Eleusine indica* (L.) Gaertn). *Buletin Anatomi dan Fisiologi*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.14710/baf.4.1.2019.1-7>
- Sudhana, A., Hardiastuti, S., & Padmini, O. S. (2018). Weeds control with herbicide dosage and frequency of PGPR toward growth and yield of paddy crops. *Agrivet*, 24(1), 1–8. <https://doi.org/10.31315/agrivet.v24i1.4667>
- Susilo, B. S. M., Indarwati, I., & Susilo, A. (2024). Allelopathy test of *Imperata cylindrica* on germination and early growth of green beans (*Vigna radiata*). *Journal of Applied Plant Technology*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.30742/skh42566>
- Syafira, E. A., Dwiyananda, F., Nikita, A. R., & Khairani, R. (2025). Efektivitas kombinasi metode uji kelarutan dalam alkohol, minyak, dan filter paper: Analisis senyawa kovalen polar dan nonpolar pada buah lokal. *SCIENCE: Jurnal Inovasi Pendidikan Matematika dan IPA*, 5(4), 1669–1678. <https://doi.org/10.51878/science.v5i4.7535>
- Talahatu, D. R., & Papilaya, P. M. (2015). Pemanfaatan ekstrak daun cengkeh (*Syzygium aromaticum* L.) sebagai herbisida alami terhadap pertumbuhan gulma rumput teki (*Cyperus rotundus* L.). *Biopendix: Jurnal Biologi, Pendidikan dan Terapan*, 1(2), 160–170. <https://doi.org/10.30598/biopendixvol1issue2page160-170>
- Tavares, R., Machado, L. N., Carneiro, L. C., Vieira, M., & Vieira, J. D. G. (2023). Bacteriophages as biological control agents and new trends in agriculture. *Enciclopédia Biosfera*, 20(44). https://doi.org/10.18677/encibio_2023b4
- Vasileiou, M., Kyrgiakos, L. S., Kleisiari, C., Kleftodimos, G., Vlontzos, G., Belhouchette, H., & Pardalos, P. M. (2023). Transforming weed management in sustainable agriculture with artificial intelligence: A systematic literature review towards weed identification and deep learning. *Crop Protection*, 176, 106522. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106522>
- Zainuddin, N. J., Salim, N., Asib, N., Ashari, S. E., Omar, D., & Lian, G. C. (2023). Genetic identification of *Parthenium hysterophorus* and phytotoxicity of its crude extract. *Journal of Plant Protection Research*, 63(1). <https://doi.org/10.24425/jppr.2022.141361>
- Zhang, Z., Becerra-Alvarez, A., & Al-Khatib, K. (2025). Physiological action of bioherbicides in weed control: A systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 7, Article 1633565. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1633565>
- Zuyina, R., Saputra, W. N. E., & Santosa, H. (2025). Keterampilan asertif: Upaya mereduksi perilaku agresif siswa. *LEARNING: Jurnal Inovasi Penelitian Pendidikan dan Pembelajaran*, 5(2), 850–860. <https://doi.org/10.51878/learning.v5i2.4349>