



STRATEGI PENGENDALIAN GULMA BERKELANJUTAN MELALUI ALELOPATI, MULSA, DAN BIOHERBISIDA: *LITERATURE REVIEW*

Fifiyanti¹, Wa Ode Nursafira²

Universitas Muhammadiyah Buton^{1,2}

e-mail: fifiy4824@gmail.com

Diterima: 29/07/2026; Direvisi: 07/08/2026; Diterbitkan: 14/08/2026

ABSTRAK

Pengendalian gulma masih menjadi tantangan besar dalam sistem pertanian karena keberadaannya dapat mengurangi produktivitas tanaman melalui persaingan dalam memperoleh air, nutrisi, cahaya, dan ruang tanam. Di sisi lain, penggunaan herbisida sintetis yang berkelanjutan telah menyebabkan berbagai dampak negatif, seperti ketahanan terhadap gulma, polusi lingkungan, dan gangguan pada organisme non-target. Kondisi ini mendorong pengembangan berbagai pendekatan pengendalian gulma yang lebih ramah lingkungan. Artikel ini bertujuan untuk meninjau dan mensintesis hasil penelitian tentang penggunaan alelopati, mulsa, dan bioherbisida sebagai strategi pengendalian gulma yang berkelanjutan. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Narrative Literature Review (NLR)* dengan pendekatan deskriptif-kualitatif. Proses tinjauan dimulai dengan identifikasi artikel berdasarkan kata kunci yang telah ditentukan sebelumnya. Artikel yang digunakan dalam tinjauan ini dipilih berdasarkan beberapa kriteria inklusi dan eksklusi. Selanjutnya, proses penyaringan dilakukan dengan meninjau judul dan abstrak untuk menilai relevansi artikel terhadap fokus penelitian. Sumber data diperoleh dari artikel ilmiah yang diterbitkan pada periode 2021–2026 melalui beberapa basis data ilmiah, kemudian dianalisis secara tematik berdasarkan kesamaan fokus penelitian. Hasil studi menunjukkan bahwa alelopati mampu menekan pertumbuhan gulma melalui aktivitas senyawa alelokimia, penggunaan mulsa efektif dalam menghambat perkecambahan gulma sekaligus memperbaiki kondisi fisik dan biologis tanah, sementara bioherbisida menawarkan alternatif pengendalian yang lebih selektif dan ramah lingkungan. Ketiga pendekatan ini memiliki mekanisme kerja yang berbeda, tetapi saling melengkapi jika diterapkan secara terintegrasi dalam sistem pengelolaan gulma. Dengan demikian, integrasi alelopati, mulsa, dan bioherbisida berpotensi menjadi strategi efektif untuk mengurangi ketergantungan pada herbisida sintetis sekaligus mendukung terwujudnya sistem pertanian yang lebih produktif, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: *Alelopati, Bioherbisida, Gulma, Mulsa, Pertanian Berkelanjutan.*

ABSTRACT

Weed control is still a big challenge in agricultural systems because its existence can reduce crop productivity through competition for water, nutrients, light, and planting space. On the other hand, the continued use of synthetic herbicides has led to a variety of negative impacts, such as resistance to weeds, environmental pollution, and disturbances to non-target organisms. This condition encourages the development of various weed control approaches that are more environmentally friendly. This article aims to review and synthesize research results on the use of allelopathy, mulching, and bioherbicides as sustainable weed control strategies. This research was conducted using the *Narrative Literature Review (NLR)* method with a descriptive-qualitative approach. The review process begins with the identification of articles

based on predefined keywords. The articles used in this review were selected based on several inclusion and exclusion criteria. Next, the screening process is carried out by reviewing titles and abstracts to assess the relevance of the article to the focus of the research. Data sources were obtained from scientific articles published in the 2021–2026 period through several scientific databases, then analyzed thematically based on the similarity of research focus. The results of the study showed that allelopathy is able to suppress weed growth through the activity of allelochemical compounds, the use of mulch is effective in inhibiting weed germination while improving the physical and biological condition of the soil, while bioherbicides offer a more selective and environmentally friendly control alternative. These three approaches have different working mechanisms, but they complement each other if applied in an integrated manner in the weed management system. Thus, the integration of allelopathy, mulching, and bioherbicides has the potential to be an effective strategy to reduce dependence on synthetic herbicides while supporting the realization of a more productive, sustainable, and environmentally friendly agricultural system.

Keywords: *Allelopathy, Bioherbicides, Weeds, Mulch, Sustainable Agriculture.*

PENDAHULUAN

Dalam sistem pertanian modern, gulma menjadi salah satu tantangan utama karena bersaing langsung dengan tanaman budidaya dalam memperoleh unsur hara, air, cahaya, maupun ruang tumbuh, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan produktivitas serta mutu hasil panen. Penggunaan herbisida sintetis yang telah berlangsung intensif selama beberapa dekade turut menimbulkan sejumlah dampak negatif terhadap lingkungan, di antaranya akumulasi residu kimia pada tanah dan perairan, terganggunya organisme yang bukan menjadi sasaran, serta timbulnya populasi gulma yang mengalami resistensi terhadap bahan aktif herbisida tertentu. Kondisi ini kemudian mendorong munculnya berbagai penelitian yang mengarah pada strategi pengendalian gulma yang lebih berwawasan lingkungan dan berkelanjutan, di antaranya melalui pemanfaatan senyawa alelopati dari tumbuhan (Anwar et al., 2021) pengembangan bioherbisida yang bersumber dari mikroorganisme (Hoagland & Boyette, 2021), serta penggunaan minyak atsiri nabati sebagai agen pengendali alami (Azizi et al., 2025). Selama satu dekade terakhir, tren penelitian di tingkat global memperlihatkan meningkatnya perhatian terhadap pendekatan agroekologis semacam ini sebagai alternatif pengendalian gulma yang selaras dengan prinsip pertanian berkelanjutan (sustainable agriculture) sekaligus berkontribusi pada terjaganya keseimbangan ekosistem pertanian.

Secara konseptual, sistem pengendalian gulma yang ideal seharusnya mampu menahan laju pertumbuhan spesies gulma sasaran secara efektif, tanpa menimbulkan efek merugikan bagi tanaman budidaya, organisme yang bukan target, maupun kualitas lingkungan sekitar, sejalan dengan prinsip efisiensi biologis dan keberlanjutan ekologis yang dianut (Bruce et al., 2022). Berbagai upaya telah dilakukan untuk mewujudkan prinsip tersebut, misalnya melalui pelepasan senyawa alelokimia yang menghambat gulma pesaing (Đorđević et al., 2022), pemanfaatan naungan dari mulsa hidup atau tanaman penutup tanah guna menekan pertumbuhan gulma (Bozzolo et al., 2025a) hingga penerapan bahan kontak alami seperti asam asetat (Webber et al., 2018). Meskipun demikian, kondisi di lapangan memperlihatkan adanya jarak antara gagasan tersebut dengan realitas praktik pertanian, sebab pengendalian gulma pada tingkat usaha tani sebagian besar masih mengandalkan herbisida sintetis mengingat sifatnya yang praktis, cepat bekerja, serta murah untuk kebutuhan jangka pendek, sedangkan metode-metode alami cenderung dipandang kurang stabil hasilnya, menuntut frekuensi maupun volume

aplikasi yang lebih besar, dan penerapannya secara terintegrasi pada skala komersial masih terbatas (Anwar et al., 2021). Adanya jarak antara konsep pengendalian gulma berkelanjutan yang bersifat ideal dengan kenyataan di lapangan yang masih didominasi oleh ketergantungan pada bahan kimia sintetis inilah yang mendasari pentingnya dilakukan tinjauan literatur secara komprehensif terhadap beragam pendekatan alami yang telah dikembangkan hingga saat ini.

Sejumlah penelitian terdahulu telah membuktikan keefektifan pengendalian gulma dengan pendekatan alami dengan berbagai metode. Dari sisi alelopati misalnya, ekstrak maupun minyak atsiri yang diperoleh dari beberapa jenis tumbuhan seperti *Deverra tortuosa* (Fayed et al., 2021), daun kenari (Đorđević et al., 2022), hingga daun tebu (Krumstri et al., 2024) menunjukkan hasil yang relatif konsisten dalam menekan perkecambahan sekaligus pertumbuhan gulma sasaran. Efek tersebut diperkirakan terjadi melalui sifat fitotoksik dari senyawa metabolit sekunder yang terkandung di dalamnya. Pendekatan mikrobiologis semakin memperkuat bukti ini, sebagaimana ditunjukkan oleh aktivitas bioherbisida jamur *Alternaria cassiae*, yang menghambat aktivitas peroksidase, pektinolitik, dan proteolitik pada bibit gulma *sicklepod* (Hoagland & Boyette, 2021), sejalan dengan temuan mengenai potensi fitotoksin selektif dari jamur fitopatogenik lainnya (Li et al., 2024) serta nanoemulsi minyak atsiri yang secara efektif menekan gulma pada tanaman safron (Azizi et al., 2025). Dalam pendekatan agronomi fisik, mulsa hidup dan tanaman penutup telah terbukti menekan populasi gulma sekaligus meningkatkan produktivitas dalam sistem pertanian organik (Bozzolo et al., 2025a; Bruce et al., 2022), sedangkan solarisasi tanah dan aplikasi asam asetat telah terbukti efektif sebagai metode non-kimia di berbagai kondisi agroekosistem (Hamdani & Susanto, 2020; Webber III et al., 2018). Secara keseluruhan, sintesis temuan-temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas pengendalian gulma alami sangat dipengaruhi oleh jenis senyawa aktif, konsentrasi, waktu aplikasi, dan karakteristik spesies gulma sasaran; oleh karena itu, ketiga pendekatan tersebut alelopati, mulsa organik, dan bioherbisida memiliki potensi untuk saling melengkapi ketika diintegrasikan ke dalam satu sistem pengendalian gulma yang berkelanjutan.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa pendekatan alami memiliki potensi besar dalam pengendalian gulma, penelitian yang tersedia hingga saat ini umumnya berfokus pada satu metode spesifik, seperti alelopati, mulsa organik, atau bioherbisida. Akibatnya, potensi interaksi dan efek sinergis di antara pendekatan-pendekatan tersebut belum diteliti secara komprehensif (Anwar et al., 2021; Bruce et al., 2022). Selain itu, hasil yang dilaporkan oleh berbagai penelitian belum menunjukkan konsistensi. Efektivitas ekstrak alelopati dan minyak atsiri diketahui sangat dipengaruhi oleh jenis gulma sasaran, dosis aplikasi, dan kondisi lingkungan; oleh karena itu, rekomendasi penggunaannya masih sulit diterapkan secara universal di berbagai kondisi (Gupta et al., 2023). Di Indonesia, penelitian mengenai herbisida botani yang memanfaatkan sumber daya lokal seperti ekstrak daun *Clidemia hirta* (Susanto, 2023) atau ekstrak rimpang dari tanaman lokal dalam budidaya kopi (Hidayat et al., 2023) masih relatif langka. Selain itu, hasil-hasil penelitian ini belum dikompilasi secara luas ke dalam tinjauan pustaka yang komprehensif. Hal ini menunjukkan masih adanya kesenjangan penelitian yaitu, terbatasnya jumlah studi yang secara sistematis dan komprehensif mengintegrasikan berbagai pendekatan pengendalian gulma alami.

Kebaruan dari artikel ini terletak pada penyajian analisis yang mengaitkan tiga strategi pengendalian gulma berkelanjutan, yaitu alelopati, penggunaan mulsa organik, dan bioherbisida dalam satu kerangka analisis yang saling terhubung. Berbeda dengan sebagian besar studi sebelumnya, yang umumnya meneliti ketiga pendekatan ini secara terpisah (Bozzolo et al., 2025a; Fayed et al., 2021), artikel ini bertujuan untuk menunjukkan keterkaitan di antara

ketiganya, sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi penerapannya dalam sistem pertanian berkelanjutan. Melalui sintesis berbagai temuan penelitian, artikel ini tidak hanya menguraikan perkembangan terkini, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing strategi, tetapi juga membahas peluang untuk mengembangkan kombinasi metode-metode tersebut yang berpotensi menghasilkan pengendalian gulma yang lebih efektif sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan (Azizi et al., 2025; Ben Kaab et al., 2024). Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan literatur di bidang agroekologi dan ilmu gulma, sekaligus berfungsi sebagai landasan untuk pengembangan strategi pengendalian gulma yang lebih terintegrasi yang bertujuan mengurangi ketergantungan pada herbisida sintesis.

Berdasarkan berbagai temuan yang disajikan, kajian literatur ini bertujuan untuk mengkaji dan mensintesis hasil penelitian mengenai penggunaan alelopati, mulsa organik, dan bioherbisida sebagai alternatif berkelanjutan untuk pengendalian gulma. Selain menganalisis keefektifan masing-masing pendekatan, kajian ini juga berupaya mengidentifikasi peluang integrasi di antara ketiganya, sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi penerapannya dalam sistem pertanian.

Dari perspektif teoretis, hasil sintesis ini diharapkan dapat memperkaya pemahaman mengenai mekanisme alelokimia, peran mikroorganisme antagonis sebagai bioherbisida, serta fungsi ekologis mulsa organik dalam menekan pertumbuhan gulma. Sementara itu, dari perspektif praktis, penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan pertimbangan bagi petani, praktisi pertanian, peneliti, dan pembuat kebijakan dalam mengembangkan strategi pengendalian gulma yang lebih efektif dan efisien, sekaligus tetap memprioritaskan kelestarian lingkungan dan kesehatan manusia. Dengan demikian, artikel ini tidak hanya merangkum bukti ilmiah yang tersedia, tetapi juga menyajikannya dalam kerangka analisis terintegrasi guna memberikan arahan bagi pengembangan strategi pengendalian gulma yang lebih adaptif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur “*Narrative Literature Review (NLR)*” dengan sifat deskriptif-kualitatif. Pendekatan ini dipilih karena penelitian ini bertujuan untuk mengkaji, membandingkan, dan mengintegrasikan berbagai temuan penelitian yang membahas strategi pengendalian gulma berkelanjutan melalui penggunaan alelopati, mulsa, dan bioherbisida sebagai alternatif herbisida sintesis dalam sistem pertanian berkelanjutan. Berbeda dengan kajian literatur “*Systematic Literature Review (SLR)*”, yang menerapkan prosedur dan standar pelaporan tertentu seperti PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) kajian literatur naratif lebih menekankan pada penyusunan sintesis konseptual dari berbagai studi dengan karakteristik, metode, dan subjek penelitian yang beragam. Pendekatan ini memungkinkan pembahasan yang lebih luas dan mendalam sesuai dengan tujuan penelitian.

Sumber data untuk penelitian ini terdiri dari data sekunder yang diperoleh melalui pencarian literatur di beberapa basis data ilmiah, termasuk Google Scholar, ScienceDirect, Semantic scholar, yang relevan dengan topik penelitian. Pencarian dilakukan menggunakan kata kunci dalam bahasa Indonesia dan Inggris, seperti alelopati (*allelopathy*), mulsa (*mulch*), bioherbisida (*bioherbicide*), pengendalian gulma (*weed management*), dan pertanian berkelanjutan. Selain itu, kombinasi kata kunci juga digunakan yaitu, “*allelopathy AND weed control*,” “*bioherbicide AND sustainable agriculture*,” dan “*mulching AND weed*

suppression” untuk memperoleh literatur yang lebih spesifik dan selaras dengan fokus penelitian. Strategi pencarian ini diterapkan untuk memastikan bahwa artikel yang diperoleh secara akurat mewakili perkembangan penelitian terkini dalam pengelolaan gulma berkelanjutan. Artikel-artikel yang digunakan dalam tinjauan ini dipilih berdasarkan beberapa kriteria inklusi, yaitu: (1) secara langsung membahas strategi pengendalian gulma menggunakan alelopati, mulsa, dan/atau bioherbisida; (2) merupakan artikel penelitian asli; (3) diterbitkan antara tahun 2021 dan 2026, sehingga mencerminkan perkembangan ilmiah terkini; (4) ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris; dan (5) tersedia dalam teks lengkap sehingga semua informasi yang diperlukan dapat dianalisis secara menyeluruh. Sebaliknya, artikel dikecualikan dari penelitian ini jika memenuhi salah satu kriteria pengecualian berikut: (1) berupa kajian literatur/literatur *review*; (2) berbentuk buku, bab buku, prosiding konferensi, skripsi sarjana, tesis magister, disertasi doctoral, editorial, atau artikel opini; (3) tidak memiliki hubungan yang jelas dengan topik penelitian; (4) tidak tersedia dalam teks lengkap; (5) merupakan artikel duplikat yang ditemukan di lebih dari satu basis data.

Proses *review* dimulai dengan identifikasi artikel berdasarkan kata kunci yang telah ditentukan sebelumnya. Selanjutnya, proses penyaringan dilakukan dengan meninjau judul dan abstrak untuk menilai relevansi artikel terhadap fokus penelitian. Artikel yang lolos tahap awal ini kemudian dibaca secara lengkap (teks lengkap) sebelum dilakukan ekstraksi data. Informasi yang dikumpulkan meliputi tujuan penelitian, metode yang digunakan, subjek penelitian, jenis bahan alelopati, jenis mulsa atau bioherbisida yang diterapkan, serta hasil utama yang diperoleh. Seluruh informasi ini kemudian dikemas dan disintesis secara naratif dengan mengelompokkan hasil penelitian ke dalam tiga tema utama: pengendalian gulma berbasis alelopati, mulsa, dan bioherbisida. Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis komparatif untuk mengidentifikasi kesamaan, perbedaan, kelebihan, keterbatasan, dan peluang pengembangan masing-masing pendekatan sebagai bagian dari upaya mendukung sistem pengendalian gulma yang lebih berkelanjutan.

Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan pendekatan analisis tematik. Analisis tersebut melibatkan pengelompokan, perbandingan, interpretasi, dan sintesis temuan penelitian yang dipilih. Tahapan-tahapan ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola dalam temuan, tren dalam hasil penelitian, tingkat efektivitas, kelebihan, keterbatasan, serta peluang pengembangan strategi pengendalian gulma berdasarkan alelopati, mulsa, dan bioherbisida. Hasil sintesis tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk pembahasan komprehensif mengenai potensi ketiga pendekatan ini sebagai alternatif pengendalian gulma yang lebih ramah lingkungan dan mendukung penerapan pertanian berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Sebanyak 17 artikel memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis dalam kajian ini. Artikel-artikel tersebut diterbitkan pada periode 2021–2026 dan berasal dari jurnal internasional bereputasi, seperti *Frontiers in Plant Science*, *Plants*, *Pest Management Science*, dan *PLOS ONE*. Berdasarkan fokus kajian, artikel dikelompokkan ke dalam tiga tema utama, yaitu alelopati (7 artikel), mulsa (4 artikel), dan bioherbisida (6 artikel). Seluruh artikel membahas strategi pengendalian gulma yang bertujuan mengurangi ketergantungan terhadap herbisida sintetis melalui pendekatan yang lebih ramah lingkungan. Hasil kajian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kajian *Narrative Literature Review* (NLR): Alelopati, Mulsa, dan Bioherbisida dalam Pengendalian Gulma

No	Penulis & Tahun	Fokus Kajian	Objek/Bahan yang Dikaji	Temuan Utama
1	Li, J. et al. (2022)	Alelopati	Akar padi (<i>Oryza sativa</i>)	Distribusi alelokimia bersifat spesifik spasial-temporal; konsentrasi tertinggi di zona akar pada fase bibit sehingga penghambatan gulma paling efektif di awal musim tanam
2	Shikanai & Gage (2022)	Alelopati	Rami/hemp (<i>Cannabis sativa</i>)	Rami memiliki potensi alelopati menjanjikan untuk pengelolaan gulma terpadu (IWM), diduga dari residu tanaman/eksudat akar
3	Bashar et al. (2023)	Alelopati	Ekstrak metanol beberapa spesies tanaman	Ekstrak menghambat perkecambahan & pertumbuhan gulma; penghambatan meningkat seiring konsentrasi ekstrak
4	Wang, T. et al. (2025)	Alelopati	Aksesi padi alelopatik & non-alelopatik	Induksi hormon eksogen meningkatkan penekanan gulma pada aksesi alelopatik; efek terbatas pada aksesi non-alelopatik
5	Li, J. et al. (2025)	Alelopati	Aksesi padi alelopatik & non-alelopatik	Aplikasi ABA eksogen meningkatkan penekanan gulma bawah tanah melalui peningkatan eksudasi akar
6	Tibugari & Chiduza (2024)	Alelopati	Sorgum (<i>Sorghum bicolor</i>) di lapangan	Efek alelopati berasal dari interaksi sinergis beberapa alelokimia, bukan senyawa tunggal (sorgoleon); kompleksitas lapangan lebih tinggi dari uji lab
7	Selim, M.E. et al. (2024)	Alelopati	Lokus genetik padi	Teridentifikasi lokus genetik terkait produksi senyawa alelokimia, membuka peluang pemuliaan varietas penekan gulma
8	Minhas et al. (2022)	Mulsa	Mulsa tanaman pada budidaya gandum	Mulsa mengurangi serangan gulma secara signifikan, memperbaiki sifat fisik-kimia tanah, dan meningkatkan hasil panen
9	Bozzolo et al. (2025a)	Mulsa	Mulsa hidup, cover crop, mulsa	Mulsa plastik lebih efektif jangka pendek; mulsa hidup & cover crop lebih unggul untuk

10	Bozzolo et al. (2025b)	Mulsa	plastik pada stroberi organik Mulsa hidup & cover crop pada artichoke organik	kesehatan tanah dan keberlanjutan jangka panjang Kombinasi mulsa hidup & cover crop efektif mengendalikan gulma sekaligus menjaga kualitas tanah; alternatif mulsa plastik
11	Schumacher & Gerhards (2022)	Mulsa	Mulsa hidup & cover crop	Meningkatkan predasi benih gulma oleh predator alami (kumbang <i>carabid</i> , dll), berfungsi sebagai mekanisme kontrol biologis
12	Hasan et al. (2021)	Bioherbisida	WeedLock (berbasis asam lemak)	Pengendalian gulma tinggi dengan selektivitas baik terhadap tanaman budidaya
13	Marzochi et al. (2026)	Bioherbisida	Minyak atsiri jeruk & serai	Menghambat perkecambahan dan pertumbuhan awal gulma secara signifikan
14	Pouresmaeil et al. (2025)	Bioherbisida	Minyak atsiri <i>Artemisia austriaca</i>	Senyawa monoterpenoid mengganggu mobilisasi cadangan makanan biji termediasi hormon, menekan perkecambahan <i>Avena fatua</i>
15	Bai et al. (2023)	Bioherbisida	Minyak atsiri bawang putih vs <i>Echinochloa crusgalli</i>	Senyawa organosulfur berpotensi sebagai bahan aktif bioherbisida berbasis tumbuhan
16	Sotelo-Cerón et al. (2023)	Bioherbisida	Jamur fitopatogenik vs <i>Convolvulus arvensis</i> (bindweed)	Isolasi & identifikasi jamur berpotensi sebagai bioherbisida untuk gulma tahunan yang sulit dikendalikan
17	Lüth et al. (2024)	Bioherbisida	Agen pelapis benih mikroba vs <i>Striga hermonthica</i>	Efektif mengendalikan gulma parasit; formulasi praktis dan siap diaplikasikan di tingkat petani

Hasil Sintesis Penelitian Alelopati

Dari tujuh artikel yang mengangkat tema alelopati, mayoritas menjadikan tanaman padi (*Oryza sativa*) sebagai objek utama kajian mulai dari pola sebaran alelokimia di sistem perakaran (Li et al., 2022), pengaruh induksi hormon eksogen terhadap kapasitas penekanan gulma (Li et al., 2025; Wang et al., 2025), sampai penelusuran dasar genetik yang mengatur sifat alelopati itu sendiri (Selim et al., 2024). Di luar padi, kemampuan alelopati juga terbukti dimiliki tanaman lain, misalnya rami/hemp (Shikanai & Gage, 2022), sorgum (Tibugari & Chiduzza, 2024), maupun sejumlah spesies tumbuhan yang diekstrak secara metanolik (Bashar et al., 2023). Bila dicermati, hasil-hasil dalam tabel ini memperlihatkan pola yang cukup konsisten: senyawa alelokimia mampu menekan perkecambahan sekaligus pertumbuhan

gulma, hanya saja besarnya efek tersebut bergantung pada jenis tanaman, dosis atau konsentrasi senyawa, serta karakter genetik dan hormonal tanaman yang bersangkutan. Pola inilah yang membuka peluang menjadikan sifat alelopati sebagai salah satu komponen pencegahan dalam program pemuliaan tanaman penekan gulma ke depannya.

Hasil Sintesis Penelitian Mulsa

Keempat artikel pada tema mulsa mengangkat objek yang cukup beragam, mulai dari penerapan mulsa tanaman pada budidaya gandum (Minhas et al., 2022), kombinasi mulsa hidup dan mulsa plastik pada stroberi organik (Bozzolo et al., 2025a) dan artichoke organik (Bozzolo et al., 2025b), hingga sumbangan tidak langsung mulsa hidup terhadap aktivitas predasi benih gulma oleh organisme predator alami (Schumacher & Gerhards, 2022). Terlepas dari perbedaan jenis dan mekanisme kerjanya, keempat penelitian ini sama-sama menunjukkan bahwa mulsa efektif menahan laju pertumbuhan gulma. Perbedaannya terletak pada karakter hasil: mulsa plastik unggul dalam penekanan gulma yang cepat pada jangka pendek, sementara mulsa hidup dan tanaman penutup tanah justru lebih menonjol dalam memperbaiki kualitas tanah dan menopang keberlanjutan sistem budidaya untuk jangka panjang. Dengan kata lain, pemilihan jenis mulsa idealnya disesuaikan dulu dengan tujuan produksi dan kondisi agroekologi di lapangan, bukan sekadar mengikuti satu jenis yang dianggap paling efektif.

Hasil Sintesis Penelitian Bioherbisida

Enam artikel pada tema bioherbisida dapat dipetakan ke dalam dua kelompok bahan. Kelompok pertama berbasis tumbuhan, meliputi WeedLock yang berbahan dasar asam lemak (Hasan et al., 2021), minyak atsiri dari jeruk dan serai (Marzochi et al., 2026), minyak atsiri *Artemisia austriaca* (Pouresmaeil et al., 2025), serta minyak atsiri bawang putih (Bai et al., 2023). Kelompok kedua berbasis mikroba, mencakup jamur fitopatogenik untuk mengendalikan gulma *bindweed* (Sotelo-Cerón et al., 2023) dan agen pelapis benih untuk menekan *Striga hermonthica* (Lüth et al., 2024). Kedua kelompok ini bekerja lewat jalur yang berbeda bioherbisida nabati umumnya mengganggu proses fisiologis saat gulma berkecambah, sedangkan bioherbisida mikroba menyerang gulma sasaran melalui mekanisme patogenik namun sama-sama menunjukkan selektivitas yang baik terhadap tanaman budidaya dan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan herbisida sintesis. Munculnya formulasi yang lebih praktis, seperti pelapis benih, juga menjadi indikasi bahwa bioherbisida kian mengarah ke bentuk yang siap diaplikasikan langsung oleh petani di lapangan.

Pembahasan

Tekanan untuk mengurangi penggunaan herbisida sintesis akibat dampaknya terhadap resistensi gulma, residu di lingkungan, dan kesehatan ekosistem telah mendorong pengembangan berbagai pendekatan pengendalian gulma yang lebih berkelanjutan. Berdasarkan analisis terhadap tujuh belas artikel terkait, teridentifikasi tiga kelompok strategi utama yang saling melengkapi: pemanfaatan sifat alelopati tumbuhan, penerapan berbagai jenis mulsa, dan pengembangan bioherbisida berbasis senyawa alami atau mikroorganisme. Ketiga strategi ini mewakili pergeseran paradigma dari pengendalian gulma kimiawi kuratif menuju pendekatan preventif, ekologis, dan terpadu dalam kerangka Pengelolaan Gulma Terpadu (IWM). Pembahasan berikut disusun berdasarkan ketiga tema tersebut, diikuti dengan sintesis integratif mengenai peluang untuk menggabungkan strategi-strategi ini dalam sistem produksi pertanian berkelanjutan.

Pengendalian Gulma Melalui Mekanisme Alelopati

Alelopati adalah kemampuan tumbuhan untuk melepaskan metabolit sekunder (alelokimia) yang dapat menghambat perkecambahan dan pertumbuhan tumbuhan lain, termasuk gulma. Padi (*Oryza sativa*) merupakan salah satu tumbuhan model yang paling banyak diteliti karena potensinya sebagai agen alelopati. Penelitian oleh Li et al. (2022) menunjukkan bahwa distribusi alelokimia di akar padi bersifat spesifik secara spasial dan temporal, dengan konsentrasi tertinggi ditemukan di sekitar zona akar selama fase pertumbuhan awal (tahap bibit); oleh karena itu, efek penghambatan terhadap gulma paling efektif selama periode kritis persaingan tanaman-gulma di awal musim tanam. Temuan ini diperkuat oleh studi lanjutan oleh Li et al. (2025), yang meneliti induksi asam absisat (ABA) pada aksesi padi alelopatik dan non-alelopatik, serta menunjukkan bahwa aplikasi ABA eksogen dapat meningkatkan strategi penekanan gulma di bawah tanah dengan meningkatkan eksudasi akar. Sejalan dengan hal ini, Wang et al. (2025) menunjukkan bahwa induksi hormon tanaman eksogen umumnya meningkatkan kapasitas penekanan gulma pada aksesi padi alelopatik, sedangkan pada aksesi non-alelopatik, peningkatan ini relatif terbatas, yang menunjukkan bahwa efektivitas induksi hormon sangat bergantung pada latar belakang genetik tanaman.

Penelitian terkini mengenai alelopati tidak hanya berfokus pada identifikasi senyawa alelokimia, tetapi juga mulai meneliti dasar genetik yang mengatur sifat ini. Studi oleh Selim et al. (2024) menunjukkan bahwa terdapat beberapa lokus genetik pada padi yang terkait dengan kemampuan tanaman tersebut untuk memproduksi senyawa alelokimia. Temuan ini membuka peluang bagi program pemuliaan tanaman untuk mengembangkan varietas padi yang mampu menekan pertumbuhan gulma secara alami melalui pendekatan seleksi yang dibantu penanda molekuler.

Potensi alelopati juga telah ditemukan pada spesies selain padi. Menurut Shikanai dan Gage (2022), rami (*Cannabis sativa*) memiliki kemampuan alelopati yang menjanjikan dan berpotensi dimanfaatkan dalam sistem pengelolaan gulma terpadu. Efek-efek ini mungkin berasal dari sisa-sisa tanaman yang tertinggal di ladang atau dari senyawa yang dilepaskan melalui eksudat akar. Di sisi lain, Bashar et al. (2023) melaporkan bahwa ekstrak metanol dari beberapa spesies tanaman dapat menghambat perkecambahan dan pertumbuhan gulma tertentu. Tingkat penghambatan cenderung meningkat seiring dengan konsentrasi ekstrak yang lebih tinggi, sehingga temuan penelitian ini menjadi dasar awal untuk pengembangan bioherbisida yang berasal dari ekstrak tanaman.

Pada skala lapangan, Tibugari & Chiduzza (2024) menyarankan bahwa efek alelopati pada sorgum (*Sorghum bicolor*) kemungkinan tidak hanya dipengaruhi oleh satu senyawa, seperti sorgoleon, tetapi merupakan hasil interaksi sinergis dari beberapa alelokimia. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas alelopati di lapangan jauh lebih kompleks daripada hasil uji laboratorium. Oleh karena itu, berbagai temuan eksperimental mengenai alelopati perlu diuji lebih lanjut di bawah kondisi agroekosistem nyata agar potensinya untuk diterapkan dalam pengendalian gulma yang berkelanjutan dapat dievaluasi dengan lebih akurat.

Secara keseluruhan, tren penelitian di bidang alelopati sedang bergeser dari karakterisasi deskriptif menuju pemahaman mengenai dasar mekanistik (jalur hormonal) dan genetiknya, serta validasi pada skala lapangan. Hal ini menunjukkan bahwa alelopati berpotensi diintegrasikan ke dalam program pemuliaan tanaman penekan gulma sebagai komponen pencegahan dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Pengendalian Gulma Melalui Aplikasi Mulsa

Pemulsaan adalah teknik pengendalian gulma yang bekerja dengan membatasi penetrasi cahaya ke permukaan tanah, sehingga menghambat perkecambahan dan pertumbuhan gulma. Selain berfungsi sebagai penekan gulma, pemulsaan juga memberikan manfaat lain bagi sistem pertanian, seperti menjaga kelembapan tanah, memperbaiki iklim mikro di sekitar akar, dan secara bertahap meningkatkan kualitas tanah. Penelitian yang dilakukan oleh Minhas et al. (2022) menunjukkan bahwa penerapan berbagai jenis mulsa tanaman dalam budidaya gandum baik dalam sistem pertanian konvensional maupun konservasi dapat secara signifikan mengurangi tingkat serangan gulma. Selain itu, penggunaan mulsa juga berkontribusi pada peningkatan sifat fisik dan kimia tanah, yang pada akhirnya menghasilkan hasil panen yang lebih tinggi dibandingkan dengan lahan yang tidak diberi perlakuan mulsa.

Dalam sistem hortikultura organik, keefektifan berbagai jenis mulsa juga telah diteliti secara mendalam. Bozzolo et al. (2025a) meneliti penggunaan mulsa hidup, tanaman penutup yang digulung, dan mulsa plastik dalam budidaya stroberi organik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa setiap jenis mulsa memiliki karakteristik dan manfaat yang berbeda. Mulsa plastik terbukti lebih efektif dalam menekan pertumbuhan gulma dalam jangka pendek, sedangkan mulsa hidup dan tanaman penutup yang digulung memberikan manfaat yang lebih besar dalam hal peningkatan kesehatan tanah dan keberlanjutan sistem budidaya dalam jangka panjang.

Temuan serupa dilaporkan oleh Bozzolo et al. (2025b) dalam budidaya artichoke organik. Penelitian tersebut mengungkapkan bahwa kombinasi mulsa hidup dan tanaman penutup yang digulung dapat secara efektif mengendalikan pertumbuhan gulma sekaligus mempertahankan kualitas tanah yang baik. Hasil ini menunjukkan bahwa strategi yang menggunakan mulsa organik dapat menjadi alternatif yang menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan pada mulsa plastik yang tidak dapat terurai secara hayati serta mendukung penerapan praktik pertanian yang lebih berkelanjutan.

Selain fungsi fisiknya, mulsa juga terbukti memiliki dampak ekologis tidak langsung terhadap pengendalian gulma. Schumacher & Gerhards (2022) menunjukkan bahwa mulsa hidup dan tanaman penutup tanah dapat memfasilitasi peningkatan predasi benih gulma oleh organisme predator (seperti kumbang *carabid* dan hewan pengerat kecil), karena struktur vegetasi mulsa menyediakan mikrohabitat yang mendukung aktivitas predator-predator tersebut. Temuan ini memperluas pemahaman kita bahwa mulsa bukan sekadar penghalang mekanis, melainkan juga alat rekayasa ekologi yang mampu mengaktifkan mekanisme pengendalian biologis alami terhadap cadangan benih gulma di dalam tanah.

Perbandingan antara jenis-jenis mulsa dalam studi-studi ini menunjukkan adanya *trade-off*: mulsa sintetis (plastik) cenderung memberikan penekanan gulma yang lebih cepat dan konsisten, namun menimbulkan risiko terhadap kesehatan tanah dan menghasilkan limbah plastik, sedangkan mulsa hidup dan tanaman penutup lebih ramah lingkungan tetapi dapat bersaing dengan tanaman utama jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, pemilihan jenis mulsa harus disesuaikan dengan tujuan produksi, jenis tanaman, dan konteks agroekologi setempat.

Pengendalian Gulma Melalui Bioherbisida

Bioherbisida menawarkan alternatif pengendalian gulma yang didasarkan pada senyawa alami atau agen biologis yang lebih selektif dan ramah lingkungan dibandingkan herbisida sintetis. Hasan et al. (2021) menguji keefektifan *WeedLock*, sebuah bioherbisida komersial berbasis asam lemak, dan menunjukkan tingkat pengendalian gulma yang tinggi dengan

selektivitas yang baik terhadap tanaman budidaya, yang mengindikasikan kesesuaian produk tersebut untuk diterapkan dalam sistem pertanian komersial. Pendekatan berbasis minyak atsiri juga telah menunjukkan hasil yang menjanjikan; Marzochi et al. (2026) melaporkan bahwa minyak atsiri jeruk dan serai secara signifikan menghambat perkecambahan dan pertumbuhan awal gulma, sementara Pouresmaeil et al. (2025) mengidentifikasi senyawa monoterpenoid dalam minyak atsiri *Artemisia austriaca* yang bekerja dengan mengganggu mobilisasi cadangan makanan biji yang dimediasi hormon, sehingga secara spesifik menekan perkecambahan *Avena fatua* pada tingkat fisiologis. Mengenai gulma sawah, sebuah studi mengenai profil fitokimia dan efek alelopati minyak atsiri bawang putih terhadap *Echinochloa crusgalli* (Bai et al., 2023) semakin mengonfirmasi bahwa senyawa organosulfur dalam bawang putih memiliki potensi sebagai bahan aktif dalam bioherbisida berbasis tumbuhan.

Selain bioherbisida berbasis tumbuhan, pengembangan bioherbisida berbasis mikroba (*mycoherbicides*) juga telah menunjukkan kemajuan yang signifikan, terutama untuk mengendalikan gulma yang sulit ditangani dengan metode konvensional. Sotelo-Cerón et al. (2023) mengisolasi, menyeleksi, dan mengidentifikasi jamur fitopatogenik yang berpotensi sebagai bioherbisida untuk mengendalikan *Convolvulus arvensis* (*bindweed*), gulma tahunan yang sulit dikendalikan karena sistem akarnya yang dalam dan luas. Dalam kasus gulma parasit yang menyebabkan kerusakan signifikan di wilayah tropis dan subtropis, Lüth et al. (2024) mengembangkan agen bioherbisida mikroba dalam bentuk pelapis benih untuk mengendalikan *Striga hermonthica*, lengkap dengan tahap-tahap produksi dan uji efektivitas di lapangan, yang menunjukkan tren pengembangan bioherbisida yang semakin berfokus pada formulasi praktis dan siap pakai di tingkat petani.

Secara umum, penelitian tentang bioherbisida menunjukkan dua jalur pengembangan utama: bioherbisida berbasis tumbuhan (ekstrak dan minyak atsiri) yang bekerja dengan mengganggu proses fisiologis selama perkecambahan, serta bioherbisida berbasis mikroba yang bekerja melalui mekanisme patogenik terhadap gulma sasaran. Kedua jalur ini saling melengkapi baik dalam hal spektrum gulma sasaran maupun mekanisme kerja, dan pengembangan formulasi (seperti pelapis benih) merupakan kunci keberhasilan adopsi bioherbisida di lapangan.

Integrasi Alelopati, Mulsa, dan Bioherbisida Dalam Pengendalian Gulma Berkelanjutan

Ketiga pendekatan pengendalian gulma ini alelopati, mulsa, dan bioherbisida pada dasarnya tidak berdiri sendiri, tetapi memiliki potensi besar untuk diterapkan secara terpadu dalam satu sistem pengelolaan gulma yang berkelanjutan. Varietas tanaman yang mampu menekan pertumbuhan gulma melalui sifat alelopati (J. Li et al., 2022, 2025; Wang et al., 2025) dapat dikombinasikan dengan penggunaan mulsa hidup atau mulsa organik (Bozzolo et al., 2025a, 2025b; Minhas et al., 2022). Kombinasi ini berpotensi meningkatkan efektivitas pengendalian, terutama pada tahap awal pertumbuhan tanaman ketika persaingan dengan gulma masih sangat tinggi. Selain itu, penerapan mulsa dapat memberikan manfaat tidak langsung, seperti meningkatkan aktivitas organisme pemangsa benih gulma, sehingga membantu mengurangi cadangan benih gulma di dalam tanah (Schumacher & Gerhards, 2022).

Dalam kondisi tertentu, terutama ketika populasi gulma tetap sulit dikendalikan, penggunaan bioherbisida berbasis tumbuhan atau mikroba (Hasan et al., 2021; Lüth et al., 2024; Pouresmaeil et al., 2025; Sotelo-Cerón et al., 2023) dapat berfungsi sebagai strategi pelengkap. Dibandingkan dengan herbisida sintesis, bioherbisida cenderung lebih selektif dan memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah, sehingga penggunaannya sejalan dengan prinsip-prinsip

pertanian berkelanjutan, yang menekankan efisiensi, keamanan lingkungan, dan pengurangan ketergantungan pada bahan kimia sintetis.

Meskipun prospeknya cukup menjanjikan, sebagian besar penelitian yang ada masih mengkaji setiap strategi secara terpisah, baik pada skala laboratorium maupun dalam uji lapangan terbatas. Studi mengenai penerapan ketiga strategi tersebut secara bersamaan misalnya, penggunaan varietas alelopatik yang dikombinasikan dengan mulsa hidup dan didukung oleh aplikasi bioherbisida masih relatif langka. Selain itu, beberapa aspek penting lainnya seperti kelayakan ekonomi, stabilitas efektivitas bioherbisida di bawah berbagai kondisi lingkungan, dan potensi dampak ekologis jangka panjang dari penggunaan mikroorganisme atau senyawa alelokimia skala besar masih memerlukan penelitian yang lebih mendalam.

Mengingat keadaan ini, penelitian di masa depan sebaiknya berfokus pada pengujian yang lebih sistematis mengenai integrasi alelopati, mulsa, dan bioherbisida di bawah kondisi budidaya dunia nyata. Pendekatan ini sangat penting untuk menentukan sejauh mana ketiga strategi ini dapat bekerja secara sinergis guna menciptakan sistem pengendalian gulma yang tidak hanya efektif dalam menekan pertumbuhan gulma, tetapi juga ramah lingkungan, layak secara ekonomi, dan mendukung keberlanjutan pertanian jangka panjang.

KESIMPULAN

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa pengendalian gulma berkelanjutan tidak lagi dapat mengandalkan satu pendekatan tunggal, tetapi memerlukan strategi yang mampu mengintegrasikan berbagai mekanisme pengendalian yang saling melengkapi. Sintesis terhadap berbagai hasil penelitian membuktikan bahwa alelopati berperan dalam menekan pertumbuhan gulma melalui aktivitas senyawa alelokimia, mulsa berfungsi menciptakan kondisi lingkungan yang kurang mendukung perkembangan gulma sekaligus memperbaiki kualitas tanah, sedangkan bioherbisida menawarkan pengendalian yang lebih selektif dengan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan herbisida sintetis. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa ketiga strategi tersebut merupakan komponen penting dalam mewujudkan sistem pengelolaan gulma yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa nilai utama dari ketiga pendekatan tersebut tidak hanya terletak pada efektivitas masing-masing metode, tetapi pada peluang untuk mengintegrasikannya dalam satu sistem pengendalian gulma terpadu. Integrasi antara tanaman beralelopati, penggunaan mulsa, dan aplikasi bioherbisida berpotensi menghasilkan pengendalian gulma yang lebih efektif, mengurangi ketergantungan terhadap herbisida sintetis, serta mendukung produktivitas tanaman dan kelestarian agroekosistem. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi alelopati, mulsa, dan bioherbisida sebagai strategi pengendalian gulma berkelanjutan telah tercapai melalui sintesis berbagai temuan ilmiah yang saling melengkapi.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang tersedia masih mengevaluasi alelopati, mulsa, dan bioherbisida secara terpisah sehingga bukti mengenai efektivitas kombinasi ketiganya pada kondisi budidaya nyata masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada pengujian strategi pengendalian gulma terpadu dalam berbagai sistem budidaya, komoditas, dan kondisi agroekologi, termasuk analisis kelayakan ekonomi, stabilitas efektivitas jangka panjang, serta dampaknya terhadap kualitas tanah dan keanekaragaman hayati. Hasil penelitian tersebut diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pengendalian gulma yang lebih aplikatif, adaptif terhadap kondisi lapangan, dan mampu mendukung penerapan pertanian berkelanjutan di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- 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, 632390. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.632390>
- Azizi, M., Sajedimehr, H., Nazari, M., Kaveh, H., & Taghizadeh, S. F. (2025). Herbicidal activity of medicinal plants essential oil using nanotechnology for saffron weed control. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1390. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07106-4>
- Bai, H., Ni, X., Han, J., Luo, D., Hu, Y., Jin, C., & Li, Z. (2023). Phytochemical profiling and allelopathic effect of garlic essential oil on barnyard grass (*Echinochloa crusgalli* L.). *PLOS ONE*, 18(4), e0272842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272842>
- 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. (2023). Evaluation of allelopathic effects of *Parthenium hysterophorus* L. methanolic extracts on some selected plants and weeds. *PLOS ONE*, 18(1), e0280159. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280159>
- Bozzolo, A., Pecenka, J., & Smith, A. (2025b). Living mulches, rolled cover crops, and plastic mulch: Effects on soil properties, weed suppression, and yield in organic strawberry systems. *Plants*, 14(21), 3385. <https://doi.org/10.3390/plants14213385>
- Bozzolo, A., Pecenka, J., Hamido, S., & Acharya, B. (2025a). Living mulches, crimped cover crops, and plastic mulch influence on soil health, weed suppression, and yield in organic globe artichoke systems. *European Journal of Agronomy*, 170, 127759. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127759>
- Bruce, D., Silva, E. M., & Dawson, J. C. (2022). Suppression of weed and insect populations by living cover crop mulches in organic squash production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 995224. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.995224>
- Đorđević, T., Đurović-Pejčev, R., Stevanović, M., Sarić-Krsmanović, M., Radivojević, L., Šantrić, L., & Gajić-Umiljendić, J. (2022). Phytotoxicity and allelopathic potential of *Juglans regia* L. leaf extract. *Frontiers in Plant Science*, 13, 986740. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.986740>
- Fayed, E. M., Abd-ElGawad, A. M., Elshamy, A. I., El-Halawany, E. F., & El-Amier, Y. A. (2021). Essential oil of *Deverra tortuosa* aerial parts: Detailed chemical profile, allelopathic, antimicrobial, and antioxidant activities. *Chemistry & Biodiversity*, 18(4), e2000914. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202000914>
- 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>
- Hamdani, K. K., & Susanto, H. (2020). Pengendalian organisme pengganggu tanaman melalui solarisasi tanah. *AGROSAINSTEK: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*, 4(2), 146–154. <https://doi.org/10.33019/agrosainstek.v4i2.127>

- Hasan, M., Mokhtar, A. S., Rosli, A. M., Hamdan, H., Motmainna, M., & Ahmad-Hamdani, M. S. (2021). Weed control efficacy and crop-weed selectivity of a new bioherbicide WeedLock. *Agronomy*, 11(8), 1488. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081488>
- Hidayat, K. A., Riniarti, D., & Widiyani, D. P. (2023). *Weeds in coffee crops*.
- Hoagland, R. E., & Boyette, C. D. (2021). Effects of the fungal bioherbicide, *Alternaria cassiae*, on peroxidase, pectinolytic and proteolytic activities in sicklepod seedlings. *Journal of Fungi*, 7(12), 1032. <https://doi.org/10.3390/jof7121032>
- Kaab, S. B, Fernández Pierna, J. A., Foncoux, B., Compère, P., Baeten, V., & Jijakli, M. H. (2024). Biochemical and physiological responses of weeds to the application of a botanical herbicide based on cinnamon essential oil. *Plants*, 13(23), 3432. <https://doi.org/10.3390/plants13233432>
- Krumsri, R., Kato-Noguchi, H., & Poonpaiboonpipat, T. (2024). Allelopathic effects of sugarcane leaves: Optimal extraction solvent, partial separation of allelopathic active fractions, and herbicidal activities. *Plants*, 13(15), 2085. <https://doi.org/10.3390/plants13152085>
- Li, H., Hou, J., Li, B., Zhang, L., & Yu, Z. (2024). A phytotoxin with selective herbicidal activity and related metabolites from the phytopathogenic fungus *Bipolaris cookei* SYBL03. *Molecules*, 29(13), 3040. <https://doi.org/10.3390/molecules29133040>
- Li, J., Lin, S., Ma, H., Wang, Y., He, H., & Fang, C. (2022). Spatial-temporal distribution of allelopathic rice roots in paddy soil and its impact on weed-suppressive activity at the seedling stages. *Frontiers in Plant Science*, 13, 940218. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.940218>
- Li, J., Wang, T., Ye, X., Chen, S., Wang, Y., & Fang, C. (2025). Effects of abscisic acid induction on the underground weed inhibition strategies of allelopathic and non-allelopathic rice accessions. *Plants*, 14(18), 2813. <https://doi.org/10.3390/plants14182813>
- Lüth, P., Nzioki, H. S., Sands Baker, C., & Sands, D. C. (2024). A microbial bioherbicide for *Striga hermonthica* control: Production, development, and effectiveness of a seed coating agent. *Pest Management Science*, 80(1), 149–155. <https://doi.org/10.1002/ps.7522>
- Marzochi, G. R., Semensato, L. D. O., de Oliveira, F. S., Silva, V. C. P., Fabri, E. G., Schinor, E. H., Hirata, A. C. S., Forim, M. R., Kauffmann, A. C., & Monquero, P. A. (2026). Essential oils as bioherbicides: Effects of orange and citronella oils on weed germination and early growth. *Pest Management Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/ps.71009>
- Minhas, W. A., Mehboob, N., Yahya, M., Rehman, H. U., Farooq, S., & Hussain, M. (2022). The influence of different crop mulches on weed infestation, soil properties and productivity of wheat under conventional and conservation production systems. *Plants*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.3390/plants12010009>



- Pouresmaeil, M., Movafeghi, A., Sabzi-Nojadeh, M., Kosari-Nasab, M., & Maggi, F. (2025). Monoterpenoids from *Artemisia austriaca* essential oil disrupt hormone-mediated reserve mobilization to suppress *Avena fatua* seed germination. *Pest Management Science*, 81(10), 6911–6927. <https://doi.org/10.1002/ps.70043>
- Schumacher, M., & Gerhards, R. (2022). Facilitation of weed seed predation by living mulch and cover crops. *Weed Research*, 62(5), 328–339. <https://doi.org/10.1111/wre.12547>
- Selim, M. E., ElShamey, E. E., ElKholy, N. A., Abdelrahman, M., Abo-Marzoka, E. A., Elgamal, W. H., Elsayed, M. A., Attia, K. A., Ghazy, A.-H., & Abdel-Haleem, H. (2024). Genetic determinants of weed control in rice (*Oryza sativa* L.) using allelopathy approach. *Cereal Research Communications*, 52(4), 1789–1798. <https://doi.org/10.1007/s42976-024-00506-6>
- Shikanai, A., & Gage, K. L. (2022). Allelopathic potential of hemp: Implications for integrated weed management. *Frontiers in Agronomy*, 4, 832471. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.832471>
- Sotelo-Cerón, N. D., Maldonado-Mendoza, I. E., Leyva-Madrigal, K. Y., & Martínez-Álvarez, J. C. (2023). Isolation, selection, and identification of phytopathogenic fungi with bioherbicide potential for the control of field bindweed (*Convolvulus arvensis* L.). *Weed Biology and Management*, 23(3–4), 99–109. <https://doi.org/10.1111/wbm.12275>
- Susanto, H. (2023). *Potensi alelopati ekstrak daun Clidemia hirta sebagai herbisida nabati pada perkecambahan gulma Cyperus kyllingia, Eleusine indica, dan Praxelis clematidea.*
- Tibugari, H., & Chiduza, C. (2024). Sorghum allelopathy under field conditions may be caused by a combination of allelochemicals. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2324528. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2324528>
- Wang, T., Ye, X., Fan, Y., Chen, S., Ma, H., & Li, J. (2025). Study on the induction of exogenous plant hormones to enhance the weed suppression ability of allelopathic and non-allelopathic rice accessions. *PeerJ*, 13, e19700. <https://doi.org/10.7717/peerj.19700>
- Webber, C. L., III, White, P. M., Jr., Shrefler, J. W., & Spaunhorst, D. J. (2018). Impact of acetic acid concentration, application volume, and adjuvants on weed control efficacy. *Journal of Agricultural Science*, 10(8), 1. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n8p1>