

Alelopati dan Masa Depan Bioherbisida Berbasis Tumbuhan: Pengaruh Genetik dan Lingkungan – Sebuah Tinjauan

Allelopathy and the Future of Plant-Based Bioherbicides: Genetic and Environmental Influences – A Review

Hariy Laksamana¹, Atika Suri¹, Indra Purnama^{1,2,3*}

¹⁾Program Studi S1 Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Lancang Kuning, Riau, Indonesia

²⁾Program Studi S2 Ilmu Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lancang Kuning, Riau, Indonesia

³⁾Pusat Riset Pertanian Tropis Berkelanjutan, Universitas Lancang Kuning, Riau, Indonesia

*Penulis untuk korespondensi E-mail: indra.purnama@unilak.ac.id

Diajukan: 08 September 2024 **Diterima:** 31 Juli 2025 **Dipublikasi:** 29 Agustus 2025

ABSTRACT

Weeds remain a persistent challenge in agriculture, significantly reducing crop productivity by competing for essential resources such as light, water, and nutrients. Although synthetic herbicides are widely used for weed control, their long-term application raises serious environmental and health concerns. As a sustainable alternative, plant-based bioherbicides that harness allelopathy—the natural chemical interactions among plants—are gaining attention. This review explores recent findings on the allelopathic potential of invasive and native plant species, focusing on key allelochemicals such as flavonoids, phenolics, and terpenoids that exhibit phytotoxic effects on weed species. Genetic factors, including specific quantitative trait loci (QTLs) and metabolic pathways involved in allelochemical production, are also discussed as critical determinants of allelopathic expression. Furthermore, environmental conditions such as temperature, soil composition, and light regimes can influence the efficacy and persistence of allelopathic compounds in the field. Understanding the synergistic interaction between genetics and environmental variables is essential for the development and optimization of effective, eco-friendly bioherbicides. This review highlights the current challenges and prospects in integrating allelopathy into weed management strategies for sustainable agriculture.

Keywords: abiotic interactions; allelochemicals; genetic variability; phytotoxic compounds; weed suppression

ABSTRAK

Gulma masih menjadi tantangan dalam bidang pertanian karena secara signifikan dapat menurunkan produktivitas tanaman melalui persaingan terhadap sumber daya penting seperti cahaya, air, dan unsur hara. Meskipun herbisida sintetis masih banyak digunakan untuk pengendalian gulma, penggunaannya dalam jangka panjang menimbulkan kekhawatiran serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan, bioherbisida berbasis tumbuhan yang memanfaatkan alelopati—interaksi kimia alami antar tanaman—semakin mendapatkan perhatian. Tinjauan ini mengeksplorasi temuan-temuan terkini mengenai potensi alelopati dari spesies tumbuhan invasif maupun asli, dengan fokus pada senyawa alelopatik utama seperti flavonoid, fenolik, dan terpenoid yang menunjukkan efek fitotoksik terhadap spesies gulma. Faktor genetik, termasuk keberadaan quantitative trait loci (QTL) spesifik dan jalur metabolismik yang terlibat dalam produksi alelokimia, dibahas sebagai determinan utama dalam ekspresi alelopati. Selain itu, kondisi lingkungan seperti suhu, komposisi tanah, dan intensitas cahaya turut memengaruhi efektivitas dan

persistensi senyawa alelopatik di lapangan. Pemahaman terhadap interaksi sinergis antara faktor genetik dan variabel lingkungan sangat penting untuk pengembangan dan optimalisasi bioherbisida yang efektif dan ramah lingkungan. Tinjauan ini menyoroti tantangan dan prospek terkini dalam integrasi alelopati ke dalam strategi pengendalian gulma untuk pertanian berkelanjutan.

Kata kunci: genetik tanaman; pengendalian gulma; senyawa alelopatik; senyawa fitotoksik; variabilitas interaksi abiotik

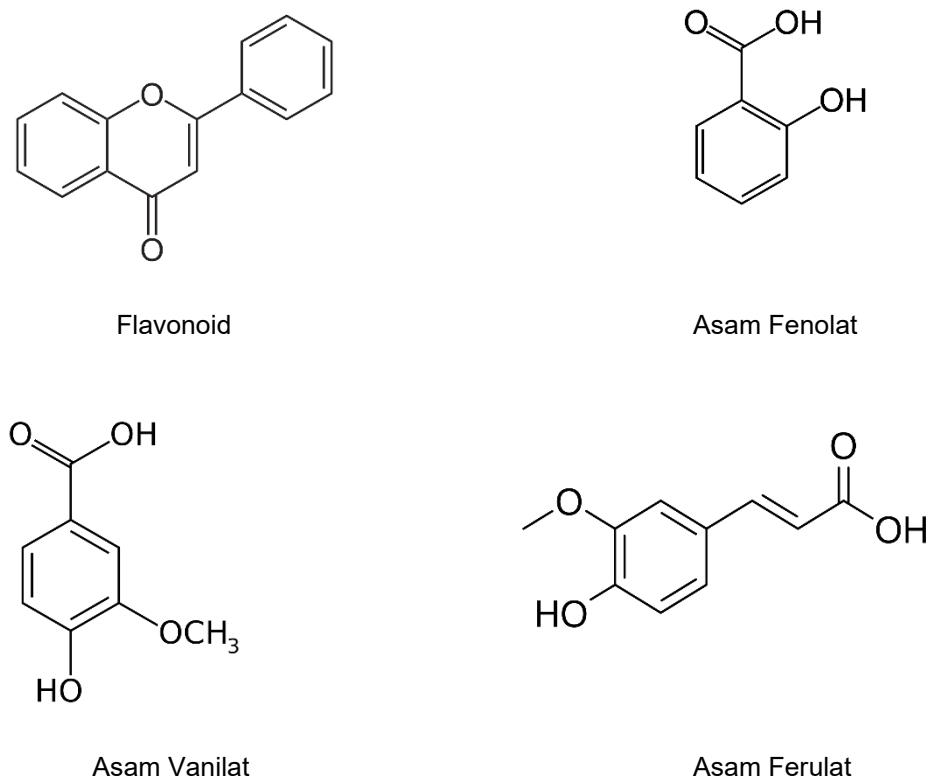
PENDAHULUAN

Alelopati merupakan bentuk interaksi biologis antar tanaman yang melibatkan pelepasan senyawa kimia, dikenal sebagai alelokimia, ke lingkungan sekitarnya. Senyawa-senyawa ini dapat memengaruhi pertumbuhan, perkembangan, dan kelangsungan hidup organisme lain, termasuk gulma, hama, dan patogen tanaman (Gaofeng *et al.*, 2018), sehingga menjadi salah satu alternatif pengganti pestisida sintetis yang seringkali menimbulkan banyak dampak negatif (Purnama *et al.*, 2025). Dalam konteks pertanian berkelanjutan, alelokimia menjadi perhatian khusus karena kemampuannya untuk digunakan sebagai dasar pengembangan bioherbisida alami. Secara umum, senyawa alelopati diekstraksi dari jaringan tanaman seperti daun atau akar, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai studi yang mengevaluasi efektivitas ekstrak daun *Carica papaya* (Anwar *et al.*, 2020), *Euphorbia guyoniana* (Otmani *et al.*, 2022), dan *Senna garrettiana* (Krumsri *et al.*, 2022) dalam menghambat perkembahan biji dan pertumbuhan gulma secara signifikan. Namun, pendekatan yang lebih inovatif kini juga mencakup proses pirolisis biomassa tanaman untuk menghasilkan produk sekunder seperti asap cair (*wood vinegar*), yang sarat akan senyawa alelokimia volatil, termasuk fenol, asam organik, dan senyawa aromatik lainnya.

Menariknya, berbagai penelitian menunjukkan bahwa alelokimia tidak hanya memiliki efek fitotoksik terhadap gulma, tetapi juga mampu menghambat pertumbuhan patogen (Anggrayni *et al.*, 2025; Purnama *et al.*, 2024a) dan menyebabkan mortalitas pada serangga hama seperti *Spodoptera*

frugiperda (Purnama *et al.*, 2024b). Potensi ini memperluas aplikasi alelopati tidak hanya sebagai dasar bioherbisida, tetapi juga sebagai bagian dari strategi pengendalian hama-penyakit berbasis bahan alami yang lebih holistik. Dengan demikian, alelokimia—baik yang diperoleh dari ekstraksi langsung maupun pirolisis biomassa—memegang peran strategis dalam pengembangan bioherbisida ramah lingkungan yang bersifat multifungsi dan adaptif terhadap tantangan pertanian tropis.

Meskipun senyawa alelopatik, baik yang diperoleh melalui ekstraksi langsung maupun hasil pirolisis, menunjukkan potensi besar dalam menekan organisme pengganggu tanaman, efektivitasnya sebagai bioherbisida di lapangan tidak hanya bergantung pada keberadaan senyawa aktif semata. Pemanfaatan alelopati secara optimal memerlukan pemahaman mendalam mengenai faktor-faktor yang memengaruhi aktivitas biologis senyawa tersebut, khususnya faktor genetik tanaman penghasil dan kondisi lingkungan tempat aplikasi. Misalnya, penelitian oleh Li *et al.* (2022) menunjukkan bahwa distribusi spasial dan temporal sistem perakaran padi alelopatik berperan penting dalam meningkatkan daya tekan terhadap gulma. Sementara itu, Kim *et al.* (2020) melaporkan bahwa suhu, polusi lingkungan, dan kepadatan awal gulma dapat memodulasi intensitas efek alelopatik dalam interaksi kompetisi tanaman. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa pengembangan bioherbisida berbasis alelopati menuntut pendekatan multidimensi yang mencakup aspek fisiologis, genetik, dan ekologis. Beberapa struktur senyawa kimia alelokimia yang umum digunakan sebagai bioherbisida dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Beberapa Senyawa Alelokimia Yang Umum Digunakan

Berbagai studi telah menunjukkan bahwa senyawa alelopatik seperti flavonoid, fenolik, dan terpenoid memiliki kemampuan menginduksi stres oksidatif pada gulma, yang menyebabkan gangguan metabolisme dan pertumbuhan. Sebagai contoh, vanilat dan asam ferulat yang diisolasi dari *Senna garrettiana* terbukti bekerja secara sinergis dalam menghambat perkembangan akar gulma (Krumsri *et al.*, 2022). Selain itu, scopoletin—senyawa fenolik lain yang dikenal—memiliki kemampuan bertahan lama di tanah saat dikombinasikan dengan nanoclay, yang secara signifikan meningkatkan persistensi dan bioaktivitasnya (Galán-Pérez *et al.*, 2022). Namun demikian, salah satu tantangan besar dalam aplikasi bioherbisida alelopatik adalah variabilitas respons gulma terhadap senyawa tersebut. Faktor ini sangat dipengaruhi oleh kondisi agroekosistem, genotipe tanaman, serta dinamika populasi gulma. Alizadeh *et al.* (2023) menunjukkan bahwa interaksi antar tanaman dalam sistem tumpangsari, seperti antara gandum (*Triticum aestivum*) dan

Amaranthus retroflexus, menghasilkan efek alelopatik yang berbeda tergantung pada rasio tanam dan kondisi lingkungan sekitar. Temuan ini mempertegas perlunya pemahaman molekuler dan fisiologis yang lebih dalam terhadap interaksi tanaman-gulma sebagai dasar untuk optimalisasi strategi pengendalian.

Oleh karena itu, penelitian tentang alelopati menjadi semakin penting untuk mendukung pengembangan sistem pertanian yang berkelanjutan dan minim input kimia. Tinjauan ini bertujuan untuk menyintesis perkembangan mutakhir terkait mekanisme kerja senyawa alelokimia, keragaman genetik tanaman alelopatik, serta pengaruh lingkungan terhadap efektivitas bioherbisida. Dengan memperkuat pemahaman terhadap dimensi ini, kita dapat merancang strategi pengelolaan tanaman yang tidak hanya efektif menekan gulma dan patogen, tetapi juga ramah terhadap lingkungan dan mendukung ketahanan agroekosistem tropis secara keseluruhan.

Potensi Bioherbisida dari Alelopati Tumbuhan pada Tumbuhan Invasif dan Tanaman Asli

Penelitian mengenai potensi bioherbisida yang berasal dari alelopati tanaman invasif dan tanaman asli menunjukkan bahwa banyak spesies tanaman mengandung senyawa bioaktif yang dapat menghambat pertumbuhan gulma. Beberapa studi mengindikasikan adanya potensi signifikan dari ekstrak tanaman

invasif dan tanaman asli dalam pengendalian gulma. Namun, analisis yang lebih komprehensif diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas, keterbatasan, dan potensi penerapan di lapangan. Tabel 1 di bawah ini menyajikan ringkasan kesimpulan dari berbagai penelitian yang telah dilakukan mengenai pengujian potensi alelopatik pada gulma serta tanaman yang dimanfaatkan sebagai bioherbisida.

Tabel 1 Potensi Bioherbisida Berdasarkan Alelopati dari Tanaman Invasif dan Tanaman Asli

Peneliti	Tanaman yang diuji	Gulma yang diuji	Senyawa alelopati yang ditemukan	Konsentrasi ekstrak	Efek pada gulma	Efek pada tanaman utama
Pannacci et al., (2020)	<i>Artemisia vulgaris</i> (Mugwort)	Amarantus retroflexus	Polisakarida, Asam Organik, Flavonoid, Terpenoid	1%, 5%, 10%	Menghambat perkecambahan, dan pertumbuhan gulma	Merangsang pertumbuhan jagung
Popolizio et al., (2022)	Limbah Minyak Zaitun (OMW)	Beberapa gulma umum	Asam Fenolat, Polisakarida	0.5%, 1%, 5%	Fitotoksik pada beberapa gulma hingga 80%	Tidak ada pengaruh signifikan pada tanaman utama
Ferraz et al., (2023)	<i>Ricinus communis</i>	<i>Cyperus rotundus</i>	Senyawa Fenolik, Terpenoid	5%, 10%, 15%	Inhibisi pertumbuhan akar dan pucuk hingga 70-85%	Tidak mempengaruhi tanaman utama (padi)
Erida et al., (2019)	<i>Imperata cylindrica</i> , <i>Cyperus rotundus</i> , <i>Chromolaena odorata</i> , <i>Ageratum conyzoides</i> , <i>Axonopus compressus</i>	Amarantus spinosus	Fenolik, Terpenoid	1%, 5%, 10%	Penghambatan perkecambahan 85%	Tidak mempengaruhi tanaman utama
Choopayak et al., (2022)	<i>Piper betle L.</i>	Gulma padi (<i>Echinocloa crus-galli</i>)	Fenilpropanoid (Alil-pirokatekol Diacetat, Eugenol)	0 mg/mL, 0.25mg/mL, 0.5mg/mL, 1 mg/mL, 2mg/mL	Menghambat perkecambahan gulma	sedikit pengaruh pada padi

Alelopati pada Tumbuhan Invasif dan Tanaman Asli

Alelopati pada tumbuhan invasif juga menunjukkan potensi yang besar dalam pengembangan bioherbisida. Tumbuhan invasif sering kali melepaskan senyawa kimia yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman lain di sekitarnya, suatu mekanisme yang dikenal sebagai alelopati. Dalam konteks ini, tumbuhan seperti *Dioscorea bulbifera L.*, *Clidemia hirta*, dan *Cyperus rotundus* mengandung senyawa-senyawa aktif yang dapat menghambat perkecambahan dan pertumbuhan tanaman asli di lingkungan tersebut.

Penelitian Oksari A.A. et al., (2021) menunjukkan bahwa ekstrak metanol dari daun *Dioscorea bulbifera L.* mengandung berbagai senyawa seperti steroid/terpenoid, alkaloid, flavonoid, saponin, dan tanin. Sebaliknya, alkaloid tidak ditemukan dalam ekstrak metanol dari umbi *Dioscorea bulbifera*. Total fenolik dalam ekstrak daun dinyatakan dalam *tannic acid equivalent* (TAE) mencapai $2,19 \pm 0,13$ mg TAE/g ekstrak sedangkan ekstrak umbi memiliki total fenolik sebesar $0,96 \pm 0,01$ mg TAE/g ekstrak. Selain itu terdapat perbedaan jenis senyawa fenolik antara ekstrak daun dan ekstrak umbi tersebut. Ekstrak daun mengandung dua jenis senyawa fenolik yaitu fenol dan 1,2-benzenediol sedangkan pada ekstrak umbi terdapat empat jenis senyawa fenolik termasuk juga phenol dan *hydroquinone* (1,4-benzendiol) serta 2-metoksifenol.

Pada Konsentrasi 75% dan 100% ditemukan menghasilkan penurunan viabilitas benih terendah dengan rata-rata laju perkecambahan sebesar $10,00 \pm 6,32\%$ (dalam ekstrak umbi) dan $0,00 \pm 6,32\%$ (dalam ekstrak daun). Penyebab terjadinya penurunan viabilitas tersebut adalah senyawa tersebut dimana menghambat perkecambahan biji selada secara signifikan. Hal ini menunjukkan adanya efek alelopati negatif terhadap tanaman selada oleh tumbuhan invasif tersebut.

Selain itu, penelitian oleh Hafsa et al., (2020) tentang ekstrak umbi teki pada tanaman selada juga menunjukkan hasil

yang serupa. Semakin tinggi konsentrasi ekstrak umbi teki yang diberikan, semakin besar pula hambatan terhadap pertumbuhan tanaman selada. Senyawa-senyawa aktif dalam ekstrak tersebut seperti fenolik dan saponin, berkontribusi terhadap penghambatan ini.

Ismaini (2015) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa ekstrak daun *Clidemia hirta* memiliki efek alelopati yang signifikan terhadap tanaman asli seperti *Impatiens platypetala*. Pada konsentrasi ekstrak yang tinggi (60%, 80%, dan 100%), ekstrak daun *C. hirta* dapat menghambat germinasi biji dan pertumbuhan tanaman asli, mengindikasikan bahwa tumbuhan invasif ini dapat memiliki dampak negatif terhadap keberlanjutan tanaman asli di ekosistem tersebut.

Dengan hasil-hasil ini, kita dapat melihat bahwa tumbuhan invasif sering kali melepaskan senyawa alelopati yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman asli di sekitarnya. Penelitian-penelitian ini memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai potensi tumbuhan invasif sebagai sumber senyawa bioherbisida. Pemahaman lebih lanjut mengenai mekanisme alelopati yang terjadi, serta identifikasi senyawa-senyawa aktif yang terlibat, akan memperkaya pengembangan bioherbisida yang berbasis pada senyawa alami dari tumbuhan invasif. Penelitian lebih lanjut di bidang ini dapat mengarah pada pengembangan alternatif pengendalian gulma yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, serta memberikan kontribusi dalam melindungi keanekaragaman hayati dan menjaga keseimbangan ekosistem.

Hubungan antara Alelopati dan Keanekaragaman Genetik serta Karakteristik Tanaman

Pada saat ini, pemahaman tentang hubungan antara alelopati, keanekaragaman genetik, dan karakteristik tanaman menjadi penting dalam bidang penelitian pertanian. Beberapa studi telah dilakukan untuk menjelaskan interaksi kompleks antara faktor-faktor tersebut.

Tabel 2. Hubungan Alelopati, Keanekaragaman Genetik, dan Karakteristik Tanaman

Tanaman (Berbagai Varietas)	Sasaran Gulma/Bio ndikator	Senyawa/ Bukti Genetik	Efek/Mekanisme	Ringkasan Temuan
Sorghum bicolor (107 aksesi SDRS)	Benih selada (<i>Lactuca sativa</i>)	Berbagai alelokimia (sorgoleo ne, dhurrin, dll); QTL (SSR)	Variasi genotipik besar pada efek inhibit; QTL terdeteksi menjelaskan 6,9– 35,6% varian fenotipe penghambatan kecambah dan panjang akar selada	Shehzad dan Okuno (2020), Kajian QTL pada 107 aksesi sorghum menunjukkan genetik mengatur efek alelopati: ada perbedaan signifikan antar varietas dalam menghambat pertumbuhan selada, dengan beberapa QTL teridentifikasi (penjelasan varian hingga 35,6%)
Oryza sativa (padi , 171 varietas japonica)	Gulma padi (<i>Echinochloa crus-galli</i>)	Momilacto ne B, tricin; QTL di kromoso m 2 & 5 (gen PAL, MYB)	Varietas berbeda menunjukkan perbedaan kemampuan alelopatis; ditemukan QTL terkait dengan metabolit fenolik (PAL) dan TF MYB yang berkaitan dengan resistensi gulma.	García-Romeral et al., (2024), Studi GWAS pada koleksi padi japonica mengungkap genetik alelopati: dua QTL utama di kromosom 2 dan 5 (gen PAL & MYB) dihubungkan dengan potensi hambatan akar gulma. Varietas yang membawa alel tertentu menunjukkan penghambatan lebih tinggi (mis. 24,9% vs 9,1% pada sumber SNP puncak). Kato- Noguchi (2023), Momilactone B dan tricin diidentifikasi sebagai allelochemicals primer melawan <i>E. crus-galli</i> .
Sereal & Legum (varietas berbeda)	Berbagai spesies gulma	DIMBOA (gandum, jagung), M- tyrosine (<i>Festuca</i>), hidoksam ato (rye), dll	Studi klasik menunjukkan adanya keragaman genetik alelopati: beberapa varietas oat, gandum, jelai, padi, rye, sorghum dll memiliki sifat alelopatis yang berbeda.	Khamare et al., (2022), melaporkan bahwa sifat alelopatis bersifat kuantitatif dan dipengaruhi gen: misalnya, populasi padi PI312777 vs varietas lain menunjukkan QTL di banyak kromosom terkait penghambatan akar gulma. Kumar et al., (2024) menyatakan Variasi ini juga diamati pada gandum dan rye (produksi DIMBOA dan BOA diwariskan secara genetik).

Salah satu penelitian yang menarik adalah penelitian oleh Shrestha et al., (2022), yang mengungkapkan bahwa padi liar memiliki potensi alelopati yang belum dieksplorasi secara genetik. Padi liar termasuk dalam genus dan spesies yang sama dengan padi yang dibudidayakan, namun lebih kompetitif daripada varietas budidaya. Mereka dapat tumbuh dengan baik bahkan di kondisi lingkungan ekstrem di mana padi budidaya biasanya tidak bisa bertahan dengan baik. Penelitian ini menggunakan metode SSR primer untuk mempelajari keragaman genetik di antara akses-akses tersebut dan menganalisis

mekanisme molekuler di balik sifat kompetitifnya. Hasilnya menunjukkan bahwa toleransi herbisida dikaitkan dengan penanda terlepas dari warna kulit bijinya, sedangkan potensi alelopati tidak menunjukkan asosiasi kuat dengan penanda molekuler yang digunakan dalam penelitian ini. Hal ini menyoroti bahwa potensi alelopati dalam padi liar mungkin lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan dan genetik lainnya yang belum sepenuhnya dipahami, serta pentingnya eksplorasi lebih lanjut terhadap mekanisme molekuler yang terlibat dalam pengaruh alelopatinya.

Li *et al.*, (2019) dalam penelitiannya mengenai kultivar padi alelopati dan non-alelopati pada tahap daun 3-6 dalam sistem hidroponik menunjukkan bahwa kultivar padi alelopati memiliki karakteristik akar halus yang signifikan lebih besar dengan diameter kurang dari 0,2 mm dibandingkan dengan kultivar non-alelopati. Selain itu, jumlah ujung akar pada varietas alelopati juga lebih banyak dan biomassa akar halusnya lebih besar. Temuan ini memberikan bukti baru bahwa potensi alelopati pada padi dapat ditingkatkan dengan mengubah sistem akarnya. Penemuan ini juga mengindikasikan bahwa perubahan dalam struktur akar tanaman bisa menjadi faktor penentu dalam meningkatkan kemampuan alelopati, yang penting dalam pengendalian gulma secara alami. Penelitian ini lebih lanjut mengidentifikasi bahwa ada korelasi antara ciri-ciri akar halus tersebut dengan potensi alelopati dan kandungan asam fenolat dalam eksudat akar padi, memberikan wawasan penting tentang bagaimana akar padi berperan dalam penghambatan pertumbuhan tanaman lain di sekitarnya.

Dalam hal suhu dan cahaya, Xu *et al.*, (2018) melakukan studi yang menunjukkan bahwa interaksi antara faktor-faktor tersebut mempengaruhi tingkat alelopati pada tanaman padi serta karakteristik fungsionalnya seperti luas daun spesifik (SLA) dan massa segmen mesofil (SMF). Dalam penelitiannya, mereka menemukan bahwa suhu tinggi dan fotoperiode panjang dapat meningkatkan efek alelopati serta mengurangi SLA pada beberapa aksesi padi dengan potensi alelopati yang berbeda. Studi ini juga menyimpulkan bahwa suhu memiliki pengaruh yang lebih besar daripada cahaya atau tahap pertumbuhan daun dalam kondisi interaksi multi-faktor. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan, terutama suhu dan cahaya, memegang peranan penting dalam mengatur ekspresi alelopati pada tanaman padi, dan bisa digunakan untuk mengoptimalkan produksi padi dengan potensi alelopati yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, hubungan antara alelopati, keanekaragaman genetik, dan karakteristik tanaman merupakan topik penelitian yang kompleks dan menarik untuk dieksplorasi lebih lanjut. Berbagai penelitian yang telah dilakukan memberikan wawasan baru dalam memahami mekanisme genetik

yang mendasari alelopati pada tanaman, termasuk padi liar, serta bagaimana suhu dan cahaya memengaruhi tingkat alelopati dan karakteristik fungsionalnya. Pemanfaatan teknologi seperti sekvensing genom secara keseluruhan atau metode genotyping lainnya, seperti genotyping-by-sequencing (GBS), dapat berkontribusi dalam identifikasi varian gen yang berkaitan dengan alelopati pada padi liar. Selain itu, perubahan yang terjadi dalam sistem akar tanaman juga dapat memengaruhi potensi alelopatinya, sehingga membuka peluang baru untuk pengembangan varietas padi dengan potensi alelopati yang lebih tinggi, yang dapat digunakan untuk pengendalian gulma secara alami.

Senyawa Alelopati dalam Pengembangan Bioherbisida

Pengembangan bioherbisida berbasis senyawa alelopati semakin mendapatkan perhatian sebagai alternatif ramah lingkungan dalam pengendalian gulma. Berbagai senyawa fitotoksik yang diisolasi dari tanaman menunjukkan potensi signifikan dalam menghambat pertumbuhan gulma, yang membuka peluang untuk penerapan dalam sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

Penelitian oleh Bari *et al.*, (2019) menunjukkan bahwa senyawa terisolasi dari *Ageratum cordifolia* memiliki efek alelopati yang menghambat pertumbuhan pucuk dan akar pada tanaman uji seperti selada (*Lactuca sativa*) dan rumput ladang. Mekanisme penghambatan ini diduga berkaitan dengan perubahan struktur sel tanaman, penghambatan pemanjangan sel, ketidakseimbangan sistem antioksidan, kerusakan aktivitas enzim, gangguan penyerapan nutrisi pada akar tanaman, serta pengaruh pada sintesis asam nukleat dan protein. Salah satu senyawa terisolasi yang bernama 3-hidroksi-alfa-ionon diyakini berkontribusi pada efek alelopati *A. cordifolia*. Temuan ini menunjukkan bahwa senyawa ini berpotensi dikembangkan sebagai bioherbisida alami yang lebih efektif, memberikan harapan baru untuk pengendalian gulma tanpa dampak negatif bagi lingkungan.

Selain itu, penelitian oleh Choopayak *et al.*, (2022) terhadap ekstrak *Piper betle L.*

mengungkapkan bahwa ekstrak ini menunjukkan aktivitas alelopati yang lebih besar pada gulma padi dibandingkan dengan tanaman padi itu sendiri. Ekstrak *P. betle* mampu menghambat perkembangan dan perkembangan kecambah gulma dalam uji laboratorium dan assay berbasis gel. Menariknya, pada konsentrasi 0,5 mg/mL, ekstrak ini hanya sedikit mempengaruhi pertumbuhan bibit padi, namun dapat mengendalikan rumput ladang yang menjadi masalah utama dalam pertanian padi. Efek penghambatan ini terutama terlihat pada perkembangan akar lateral dan mahkota yang mirip dengan senyawa eugenol. Temuan ini menunjukkan bahwa *P. betle L.* memiliki potensi sebagai bioherbisida alami yang selektif, memberikan kontrol yang baik terhadap gulma tanpa merugikan tanaman padi, sehingga membuka peluang untuk pengembangan produk bioherbisida yang ramah lingkungan dan aman bagi manusia.

Penelitian Krumsri *et al.*, (2022) melibatkan ekstrak metanol dari daun *Synedrella garrettiana*, yang menunjukkan efek penghambatan pertumbuhan pada tanaman uji dalam konsentrasi tertentu. Semakin tinggi konsentrasi ekstrak, semakin besar penghambatan pertumbuhannya. Fraksinasi ekstrak berbasis bioassay menghasilkan isolasi asam vanilat dan asam ferulat, dua senyawa yang memiliki efek serupa terhadap pertumbuhan akar *L. sativum*. Asam ferulat memiliki tingkat penghambatan yang lebih besar dibandingkan asam vanilat, dan campuran rendah kedua senyawa ini menunjukkan efek sinergis dalam menghambat pertumbuhan akar *L. sativum*. Penelitian ini menunjukkan bahwa senyawa fitotoksik dalam ekstrak daun *S. garrettiana* memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai herbisida alami. Sehingga pentingnya mengeksplorasi kombinasi senyawa alami dalam meningkatkan efektivitas bioherbisida.

Hasil penelitian Kim *et al.*, (2020) menunjukkan bahwa faktor suhu dapat mempengaruhi keunggulan kompetitif antara alga alelopati dan non-alelopati. Meskipun efek polutan dan suhu pada alelokimia belum sepenuhnya dipahami, penelitian ini menyoroti kompleksitas interaksi lingkungan dengan senyawa alelopati. Kondisi lingkungan yang berubah, seperti suhu dan polusi, dapat mempengaruhi efektivitas

senyawa alelopati dalam mengendalikan kompetisi antara spesies, sehingga penting untuk memahami dinamika lingkungan dalam pengembangan bioherbisida berbasis alelopati.

Penelitian lainnya oleh Li *et al.*, (2022) menyoroti pentingnya faktor lingkungan dalam pengembangan bioherbisida berbasis alelopati pada padi. Kultivar padi alelopati memiliki akar dengan karakteristik tertentu yang memungkinkan mereka menekan pertumbuhan gulma padi. Distribusi akar yang berkorelasi dengan kandungan asam fenolat pada lapisan tanah lateral berperan dalam aktivitas penekan gulma. Hasil penelitian memberikan wawasan tentang bagaimana sistem akar tanaman dapat mempengaruhi efektivitas alelopati dan bagaimana pengelolaan tanaman alelopati dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan gulma dalam pertanian padi.

Pérez *et al.*, (2022) melakukan penelitian mengenai interaksi scopoletin dengan granul organoclay Cloisite 10A untuk melindungi biodegradasi cepat alelokimia dalam tanah alkalin. Difusi intrapartikel melalui granul organoclay meningkatkan persistensi alelokimia dan mendukung ekspresi fitotoksitasnya, yang menunjukkan bahwa teknologi ini dapat digunakan untuk meningkatkan efektivitas dan durabilitas bioherbisida berbasis senyawa alelopati dalam kondisi tanah yang tidak mendukung.

Alizadeh *et al.*, (2023) menemukan bahwa kepadatan tinggi *redroot pigweed* (*Amaranthus retroflexus*) dapat mengurangi pertumbuhan gandum (*Triticum aestivum*) dan meningkatkan aktivitas sistem antioksidan enzimatik pada gandum. Sebaliknya, jika kepadatan gandum lebih tinggi dari *redroot pigweed*, aktivitas enzim antioksidan akan mendukung peningkatan pertumbuhan gandum. Hasil ini mengindikasikan bahwa alelokimia yang dihasilkan oleh *redroot pigweed* dapat mempengaruhi pertumbuhannya sendiri dan terbatas pada kepadatan gandum yang tinggi. Aktivitas enzim antioksidan yang teramat pada akar dan pucuk kedua tanaman menunjukkan adanya respons fisiologis terhadap stres oksidatif yang disebabkan oleh alelokimia. Temuan ini memberikan wawasan lebih lanjut tentang bagaimana interaksi antara tanaman dan senyawa alelopati dapat mempengaruhi

pertumbuhan tanaman target dan perluasan aplikasi bioherbisida.

Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian ini memberikan gambaran yang jelas bahwa senyawa alelopati yang diisolasi dari berbagai tanaman memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai bioherbisida alami. Senyawa-senyawa seperti 3-hidroksi-alfa-ionon, eugenol, asam vanilat, dan asam ferulat dapat menghambat pertumbuhan gulma tanpa memberikan dampak negatif terhadap tanaman budidaya. Namun, faktor lingkungan seperti suhu, kepadatan tanaman, dan komposisi tanah memainkan peran penting dalam efektivitas alelopati, dan oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami dinamika interaksi lingkungan dalam aplikasi bioherbisida berbasis alelopati.

Mekanisme Alelopati dan Faktor yang Memengaruhinya

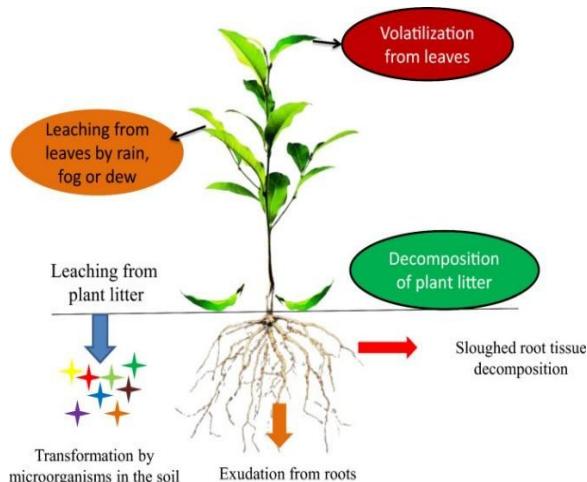
Mekanisme alelopati yang terjadi dalam pengembangan bioherbisida sangat dipengaruhi oleh senyawa fitotoksik yang terdapat dalam ekstrak tanaman. Penelitian oleh Bari et al., (2019) terhadap *Ageratum cordifolia* mengidentifikasi senyawa yang memiliki potensi sebagai bioherbisida, yaitu 3-hidroksi-alfa-ionon. Senyawa ini dapat menghambat pertumbuhan pucuk dan akar pada selada dan rumput ladang dengan cara mengganggu proses metabolismik pada tingkat seluler, yang pada akhirnya mengurangi kemampuan gulma untuk berkembang.

Mekanisme penghambatannya melibatkan perubahan struktur sel tanaman, penghambatan pemanjangan sel, ketidakseimbangan sistem antioksidan, kerusakan aktivitas enzim, dan gangguan

pada penyerapan nutrisi oleh akar. Selain itu, senyawa ini juga memengaruhi sintesis asam nukleat dan protein yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman, yang menunjukkan potensi aplikasinya dalam pengembangan bioherbisida berbasis bahan alami.

Selain itu, penelitian oleh Choopayak et al., (2022) terhadap ekstrak daun *Piper betle* (*P. betle L.*) menunjukkan aktivitas alelopati yang lebih kuat terhadap gulma padi dibandingkan dengan tanaman padi itu sendiri. Ekstrak *P. betle* mampu menghambat perkembangan kecambah gulma dalam uji laboratorium dan assay berbasis gel. Pada konsentrasi rendah, ekstrak ini hanya sedikit mempengaruhi pertumbuhan bibit padi tetapi secara signifikan mengendalikan rumput ladang yang sering menjadi masalah utama dalam pertanian padi. Efek penghambatan utama terlihat pada perkembangan akar lateral dan mahkota, yang mirip dengan pengaruh eugenol. Ini menunjukkan bahwa *P. betle* memiliki potensi besar sebagai bioherbisida alami yang ramah lingkungan dan dapat digunakan untuk mengendalikan gulma di lahan pertanian.

Krumsri et al., (2022) juga mengidentifikasi senyawa fitotoksik dalam ekstrak metanol daun *S. garrettiana* yang memiliki potensi sebagai bioherbisida alami. Senyawa yang terisolasi dari ekstrak ini, yaitu asam vanilat dan asam ferulat, terbukti dapat menghambat pertumbuhan akar *L. sativum*, dengan asam ferulat memberikan efek penghambatan yang lebih besar. Tabel 3 menunjukkan efek penghambatan asam vanilat dan asam ferulat pada pertumbuhan.



Gambar 2. Mekanisme Alelopati. (Kumar et al., 2024)

Tabel 3. Efek Penghambatan Asam Vanilat dan Asam Ferulat pada Pertumbuhan Tanaman Uji

Senyawa	Parameter Pertumbuhan	IC50 (mm)
Asam Vanilat	Daya Berkecambah	7,14
	Panjang Tunas	0,93
	Panjang Akar	0,82
	Biomassa kering	1,81
Asam Ferulat	Daya Berkecambah	1,62
	Panjang Tunas	0,71
	Panjang Akar	0,62
	Biomassa kering	0,82

Semakin tinggi konsentrasi ekstrak, semakin besar penghambatan pertumbuhannya. Fraksinasi berbasis bioassay dari ekstrak tersebut menghasilkan isolasi dua senyawa penting, yaitu asam vanilat dan asam ferulat, yang keduanya memiliki efek serupa terhadap pertumbuhan akar *Lactuca sativa*, dengan tingkat penghambatan yang lebih besar pada asam ferulat dibandingkan dengan asam vanilat. Menariknya, campuran rendah kedua senyawa ini juga menunjukkan efek sinergis dalam menghambat pertumbuhan akar *L. sativum*. Ini mengindikasikan bahwa senyawa-senyawa fitotoksik dalam ekstrak *S. garrettiana* memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai herbisida alami yang efektif. Dalam hal ini, penelitian Krumsri *et al.*, (2022) mendorong untuk mengevaluasi lebih dalam mekanisme sinergis antara senyawa-senyawa tersebut dan bagaimana mereka berinteraksi pada tingkat molekuler dalam tanaman target.

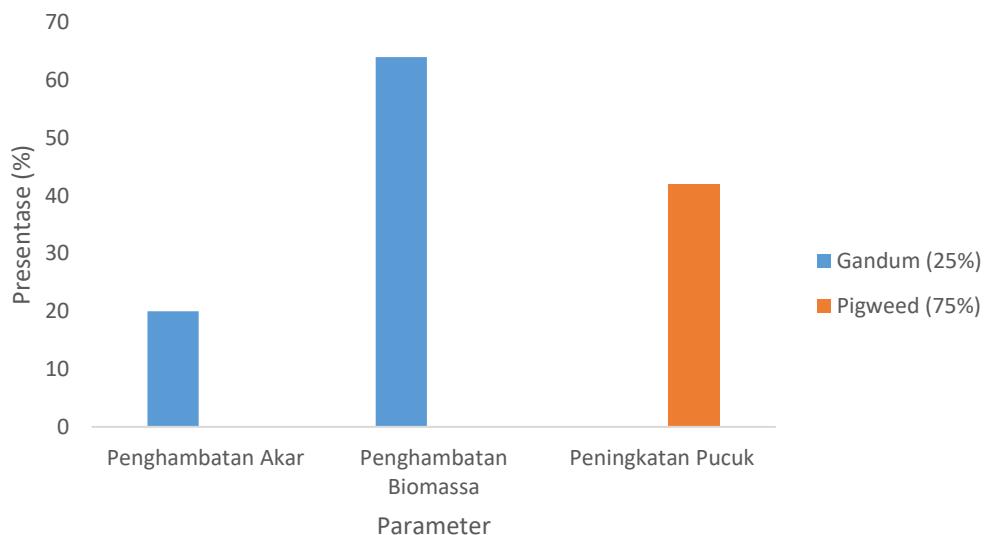
Selain pengaruh langsung senyawa fitotoksik, faktor lingkungan juga berperan penting dalam mekanisme alelopati. Penelitian oleh Kim *et al.*, (2020) menunjukkan bahwa faktor suhu dapat mempengaruhi kompetisi antara alga alelopati dan non-alelopati. Namun, efek ini juga dapat dipengaruhi oleh polutan dan kelimpahan awal alga, yang menunjukkan bahwa variabilitas lingkungan, seperti suhu dan polutan, dapat memengaruhi efektivitas mekanisme alelopati dalam pengendalian gulma atau organisme lain. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih dalam mengenai pengaruh faktor lingkungan terhadap alelokimia dapat membantu dalam

merancang strategi bioherbisida yang lebih efisien.

Selain itu, Li *et al.*, (2022) menunjukkan bahwa dalam padi, aktivitas penekan gulma yang dimiliki oleh kultivar padi alelopati terkait erat dengan karakteristik akar yang memungkinkan padi menghambat pertumbuhan gulma padi. Fenomena ini terjadi karena distribusi akar yang lebih baik serta kandungan asam fenolat pada lapisan tanah lateral 6-12 cm yang berfungsi menekan gulma. Hal ini membuka peluang untuk mengembangkan sistem pertanian berkelanjutan melalui pemanfaatan varietas padi alelopati yang tidak hanya menghasilkan produk padi yang optimal tetapi juga dapat mengurangi masalah gulma secara alami.

Pérez *et al.*, (2022) menyatakan bahwa interaksi scopoletin dengan granul organoclay Cloisite 10A dapat meningkatkan ketahanan alelokimia terhadap biodegradasi dalam tanah alkalin. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknik difusi intrapartikel menggunakan organoclay dapat meningkatkan persistensi senyawa alelokimia, sehingga dapat meningkatkan ekspresi fitotoksitas dan memperkuat mekanisme pengendalian gulma. Oleh karena itu, penggunaan teknik ini dapat memperbaiki efektivitas bioherbisida dalam kondisi tanah yang tidak mendukung degradasi senyawa secara cepat.

Alizadeh *et al.*, (2023) menyatakan bahwa kepadatan tinggi *redroot pigweed* (*Amaranthus retroflexus*) dapat mengurangi pertumbuhan gandum (*Triticum aestivum*) dan meningkatkan aktivitas sistem antioksidan enzimatik pada gandum. Seperti pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Pengaruh Kepadatan Gandum dan Pigweed Terhadap Pertumbuhan

Alelokimia pigweed dominan pada kepadatan 75%, menghambat pertumbuhan gandum. Pigweed memanfaatkan ruang dan nutrisi lebih efisien, sehingga pertumbuhan pucuknya meningkat. Namun, jika kepadatan gandum lebih tinggi daripada *redroot pigweed*, fungsi sistem antioksidan enzimatik akan meningkatkan pertumbuhan gandum. Ini menunjukkan bahwa alelokimia yang dihasilkan oleh *A. retroflexus* tidak hanya mempengaruhi pertumbuhannya sendiri tetapi juga dapat mengganggu pertumbuhan tanaman lain melalui modifikasi aktivitas sistem antioksidan. Aktivitas enzim antioksidan yang diamati pada akar dan pucuk kedua tanaman menunjukkan adanya respons fisiologis terhadap stres oksidatif yang disebabkan oleh alelokimia.

Secara keseluruhan, pengembangan bioherbisida berbasis alelopati tidak hanya bergantung pada senyawa fitotoksik yang dihasilkan oleh tanaman, tetapi juga dipengaruhi oleh mekanisme molekuler yang terlibat dalam interaksi tanaman dengan lingkungan dan faktor eksternal lainnya. Senyawa alelopati dari berbagai tanaman menunjukkan potensi besar untuk pengendalian gulma alami, dengan mekanisme kerja yang melibatkan penghambatan berbagai proses fisiologis dalam tanaman target, termasuk penghambatan pertumbuhan akar, kerusakan struktur sel, dan gangguan pada metabolisme enzimatik. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan penggunaan senyawa-senyawa ini, termasuk

evaluasi interaksi senyawa fitotoksik secara sinergis dan efeknya dalam konteks faktor lingkungan yang beragam.

KESIMPULAN

Penelitian tentang senyawa alelopati dalam pengendalian gulma menunjukkan potensi besar untuk mengembangkan bioherbisida berbasis bahan alami yang ramah lingkungan. Senyawa fitotoksik yang terisolasi dari berbagai tanaman, seperti *Ageratum cordifolia*, *Piper betle*, dan *Senna garrettiana*, terbukti memiliki kemampuan untuk menghambat pertumbuhan gulma dengan mekanisme yang melibatkan gangguan pada struktur sel, pemanjangan sel, aktivitas enzim, serta penyerapan nutrisi oleh akar tanaman. Senyawa-senyawa ini, seperti 3-hidroksi-alfa-ionon, eugenol, asam vanilat, dan asam ferulat, juga berpotensi menghasilkan efek sinergis yang lebih kuat ketika digabungkan dalam konsentrasi tertentu. Selain faktor internal tanaman, faktor lingkungan, seperti suhu dan polutan, juga memengaruhi efektivitas senyawa alelopati. Peningkatan pemahaman tentang interaksi antara senyawa fitotoksik dan faktor eksternal ini penting dalam mengoptimalkan penggunaan bioherbisida alami. Pemilihan varietas tanaman dengan karakteristik alelopati tinggi, seperti padi alelopati, dapat menjadi strategi efektif untuk pengelolaan gulma secara berkelanjutan. Dengan demikian, pengembangan bioherbisida berbasis alelopati memiliki potensi besar

untuk mengurangi ketergantungan pada herbisida kimia yang dapat merusak lingkungan. Diharapkan penelitian lanjutan yang lebih mendalam mengenai mekanisme molekuler, interaksi sinergis antar senyawa, serta pengaruh faktor lingkungan akan semakin memperkuat keberlanjutan dan efektivitas penerapan bioherbisida dalam pengelolaan gulma di pertanian.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Lancang Kuning dan Kementerian Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi atas fasilitas dan dukungan akademik yang telah diberikan selama proses penulisan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggrayni, D., Purnama, I., Saidi, N. B., Novianti, F., Baharum, N. A., Mutamima, A., Razali, N. A. S. B & Boukherroub, R. 2025. Antifungal and phytotoxicity of wood vinegar from biomass waste against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* TR4 infecting banana plants. *Discover Food*, 5(1): 98. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00377-8>.
- Anwar, T., Qureshib, H., Parveenc, N., Bashirc, R., Qaisard, U., Munazire, M., Yasmine, S., Basitf, Z., Mahmoodg, R.T., Nayyarh, B.G., Khani, S., Khanj, S.A., Qureshik M.M., Walii, M. 2020. Evaluation of bioherbicidal potential of *Carica papaya* leaves. *Brazilian Journal of Biology*. 80(3): 565-573. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.216359>.
- Alizadeh, Z., Motafakkerazad, R., Lisar, S.Y.S., & Zarrini, G., 2023. Evaluation of the allelopathic effect of wheat and redroot pigweed on growth indices and antioxidant system activity in intercropping. *Journal of Plant Protection Research*, 63(1): 97-112. <https://doi.org/10.24425/jppr.2023.144508>.
- Arsa, A.J.W., Chozin, M.A., & Lontoh, A.P., 2020. Peningkatan Keefektifan Bioherbisida Berbahan Dasar Umbi Teki dengan Surfaktan dalam Menekan Perkecambahan. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 48(1): 97-103. <https://doi.org/10.24831/jai.v48i1.29209>
- Bari, I.N., Noguchi, H.K., Iwasaki, A., & Suenaga, K., 2019. Allelopathic Potency and an Active Substance from *Anredera cordifolia* (Tenore) Steenis. *Plants*, 8(134). <https://doi.org/10.3390/plants8050134>.
- Choopayak, C., Aranyakanon, K., Prompakdee, N., Nangngam, P., Kongbangkerd, A., & Ratanasut, K., 2022. Effects of *Piper betle* L. Extract and Allelochemical Eugenol on Rice and Associated Weeds Germination and Seedling Growth. *Plants*, 11(3384). <https://doi.org/10.3390/plants11233384>.
- Erida, G., Saidi, N., Hasanuddin, & Syafruddin, 2019. Allelopathic Screening of Several Weed Species as Potential Bioherbicides. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 334(012034). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/334/1/012034>.
- Ferraz, R.L.S., Costa, P.S., Dias, G.F., Silva, J.R., Viégas, P.R.A., Medeiros, A.S., Neto, J.D., & Melo, A.S., 2023. Allelopathy of *Ricinus communis* and Light Spectrum Variation Decrease Emergence and Growth of *Cyperus rotundus*. *Bioscience Journal*, 39(e39023). <https://doi.org/10.14393/BJ-v39n0a2023-63062>.
- Garcia-Romeral, J., Castanera, R., Casacuberta, J. Domingo, C. 2024. Deciphering the Genetic Basis of Allelopathy in japonica Rice Cultivated in Temperate Regions Using a Genome-Wide Association Study. *Rice*. 17(22). <https://doi.org/10.1186/s12284-024-00701-3>

- Gaofeng, X., Shicai, S., Fudou, Z., Yun, Z., Hisashi, K.N., David, R.C. 2018. Relationship Between Allelopathic Effects and Functional Traits of Different Allelopathic Potential Rice Accessions at Different Growth Stages. *Rice Science*, 25(1): 32-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsci.2017.09.001>.
- Hafsa, S., Hasanuddin, Erida, G., & Nura, 2020. Efek Alelopati Teki (*Cyperus rotundus*) Terhadap Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca sativa*). *Jurnal Agrista*, 24(1). <https://doi.org/10.17969/agrista.v24i1.18843>.
- Ismaini, L., 2015. Pengaruh alelopati tumbuhan invasif (*Clidemia hirta*) terhadap germinasi biji tumbuhan asli (*Impatiens platypetala*). *PROS SEM NAS MASY BIODIV INDON*, 1(4): 834-837. <https://doi.org/10.13057/psnmbi/m010429>.
- Kato-Noguchi, H. 2023. Defensive Molecules Momilactones A and B: Function, Biosynthesis, Induction and Occurrence. *Toxins*, 15(241). <https://doi.org/10.3390/toxins15040241>
- Khamare, Y., Chen, J., Marble, S.C. 2022 Allelopathy and its application as a weed management tool: A review. *Front. Plant Sci.* 13:1034649. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649>.
- Kim, Y., Son, J., Lee, Y.S., Wee, J., Lee, M., & Cho, K., 2020. Temperature-Dependent Competitive Advantages of an Allelopathic Alga Over Nonallelopathic Alga Are Altered by Pollutants and Initial Algal Abundance Levels. *Scientific Reports*, 10(4419). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61438-9>.
- Kumar, N., Singh, H., Giri, K., Kumar, A., Joshi, A., Yadav, S., Singh, R., Bisht, S., Kumari, R., Jeena, N., Khairakpam, R., Mishra, G. 2024. Physiological and molecular insights into the allelopathic effects on agroecosystems under changing environmental conditions. *Physiol Mol Biol Plants*, 30(3): 417-433. <https://doi.org/10.1007/s12298-024-01440-x>.
- Krumsri, R., Iwasaki, A., Suenaga, K., & Kato-Noguchi, H., 2022. Assessment of Allelopathic Potential of *Senna garrettiana* Leaves and Identification of Potent Phytotoxic Substances. *Agronomy*, 12(139). <https://doi.org/10.3390/agronomy12010139>.
- Li, J., Lin, S., Zhang, Q., Zhang, Q., Hu, W., & He, H., 2019. Fine-Root Traits of Allelopathic Rice at the Seedling Stage and Their Relationship with Allelopathic Potential. *PeerJ*, 7(e7006). <http://doi.org/10.7717/peerj.7006>.
- Li, J.Y., Lin, S.X., Ma, H.Y., Wang, Y.P., He, H.B., & Fang, C.X., 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>.
- Oksari, A.A., Wanda, I.F., & Wardhani, G.A.P.K., 2021. Alelopati Tumbuhan Invasif *Dioscorea bulbifera* L. dan Pengaruhnya Terhadap Perkecambahan Biji *Shorea selanica* (Lam.) Blume. *AL-KAUNIYAH: Jurnal Biologi*, 14(1): 101-114. <http://dx.doi.org/10.15408/kauniyah.v14i1.16160>.
- Otmani, R., Khene, B., Kemassi, A., Araba, F., Benaceur, F., & Houyou, Z., 2022. Phytochemical Screening, Allelopathic and Bioherbicidal Potentialities of *Euphorbia guyoniana* Boiss. and Reut. Leaf Extract. *Al-Qadisiyah Journal for Agriculture Sciences (QJAS)*, 12(2): 26-34. <https://doi.org/10.33794/qjas.2022.134311.1053>.
- Pannacci, E., Masi, M., Farneselli, M., & Tei, F., 2020. Evaluation of Mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) Aqueous Extract

- as a Potential Bioherbicide to Control *Amaranthus retroflexus* L. in Maize. *Agriculture*, 10(642). <https://doi.org/10.3390/agriculture10120642>.
- Pérez, J.A.G., Gámiz, B., & Celis, R., 2022. Granulated Organoclay as a Sorbent to Protect the Allelochemical Scopoletin from Rapid Biodegradation in Soil. *Environmental Technology & Innovation*, 28(102707). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102707>.
- Popolizio, S., Fracchiolla, M., Leoni, B., Cazzato, E., Camposeo, S., 2022. Phytotoxic Effects of Retentates Extracted from Olive Mill Wastewater Suggest a Path for Bioherbicide Development. *Agronomy*, 12(1378). <https://doi.org/10.3390/agronomy12061378>.
- Purnama, I., Swebocki, T., Ihsan, F., Mutamima, A., Boukherroub, R., Mechouche, M. S., & Fadilaturahmah, F. 2024a. Evaluation of Four Indonesian Leaf Extracts for Their Antimicrobial Activity against *Staphylococcus aureus* (MRSA) & *Escherichia coli* (K-12). In *E3S Web of Conferences* (Vol. 593, p. 05001). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459305001>.
- Purnama, I., Lestari, S. D., Lidar, S., Mutamima, A., Suri, A., Nelvia, N., & Malhat, F. M. 2024b. Effectiveness of wood vinegar from torrefied coconut shells as an eco-friendly pesticide against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* JE Smith). In *E3S web of conferences* (Vol. 593, p. 03004). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459303004>.
- Purnama, I., Malhat, F., Mutamima, A., Nelvia, N., & Amalia, A. 2025. Multiple Pesticide Residues in Rice and Chlorpyrifos Persistence in Peat Soils. *Sustainable Chemistry One World*, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2025.100080>
- Robles, J.H.S., Enríquez, C.F.L., Reyes, A.G., Requena, M.C., González, L.J., Martínez, T.K., Valdés, J.A., & Morales, M.A., 2023. Initial Study of Fungal Bioconversion of *Guishe* (*Agave lechuguilla* Residue) Juice for Bioherbicide Activity on Model Seeds. *Fermentation*, 9(421): 2-14. <https://doi.org/10.3390/fermentation9050421>.
- Scavo, A., Restuccia, A., Pandino, G., Onofri, A., & Mauromicale, G., 2018. Allelopathic Effects of *Cynara cardunculus* L. Leaf Aqueous Extracts on Seed Germination of Some Mediterranean Weed Species. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1021): 119-125. <https://doi.org/10.4081/ija.2018.1021>.
- Shehzad, T., Okuno, K. 2020. Genetic analysis of QTLs controlling allelopathic characteristics in sorghum. *PLoS One*, 15(7):e0235896. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235896>.
- Shrestha, S., Sharma, G., Stallworth, S., Redona, E.D., & Tseng, T.M., 2022. Exploring the Genetic Diversity among Weedy Rice Accessions Differing in Herbicide Tolerance and Allelopathic Potential. *Diversity*, 14(44). <https://doi.org/10.3390/d14010044>.