



Profil Senyawa Alelokimia Ekstrak Akar Raton Sorgum Berdasarkan Analisis GC-MS sebagai Kandidat Bioherbisida



Edi Susilo^{1*}, Nanik Setyowati², Uswatun Nurjanah², Hesti Pujiwati², Riwandi³

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

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

³) Program Studi Ilmu Tanah, Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu. Jl. WR. Supratman Kandang Limun Kota Bengkulu, Propinsi Bengkulu, Indonesia

*Korespondensi e-mail: susilo_agr@yahoo.com

DOI: <https://doi.org/10.33369/pendipa.10.1.211-222>

ABSTRACT

[Profile of Allelochemical Compounds in Raton Sorghum Root Extract Based on GC-MS Analysis as a Bioherbicide Candidate] From the past until now, weed control using synthetic herbicides has remained the primary method. The use of synthetic herbicides in modern agricultural processes still has negative impacts on the environment, health, and weeds, thereby potentially causing weed resistance. Therefore, planting herbal bioherbicides is a more environmentally friendly method of weed control. Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench), in particular, has allelopathic exudates that are very troublesome for weeds. This study focused on analyzing the chemical allelopathy of sorghum root extracts and identifying candidate bioherbicide compounds in the roots using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) analysis. Sorghum was extracted using a cold maceration method obtained from a mixture of solvents with different configurations. Then, through GC-MS, the solvents were extracted, and the compounds were separated. As a result, through GC-MS analysis, 20 compounds were identified, most of which were detected in the steroid, sterol, and fatty acid derivative groups. The most prominent compounds detected were 4, 22-stigmastadien-3-one (20.74%); stigmasterol (total 16.47%); cholest-4-en-26-oic acid, 3-oxo- (11.68%); and 9-octadecenamide (Z) (7.69%). Several polar compounds, such as 9-octadecenamide (Z) and cyclohexanol derivatives, exhibited excellent capabilities. Therefore, sorghum root extract contains allelochemical compounds that have the potential to be sustainable and environmentally friendly bioherbicides.

Keywords: allelopathy; bioherbicide; GC-MS; root; sorghum.

ABSTRAK

Dari dahulu hingga sekarang, pengendalian gulma dengan menggunakan herbisida sintesis masih menjadi metode yang utama. Penggunaan herbisida sintesis di dalam proses pertanian modern masih memiliki dampak negatif untuk lingkungan, kesehatan, dan gulma, sehingga berpotensi menimbulkan resistensi gulma. Oleh karena itu, penanaman bioherbisida herbal yang lebih merangkapakan pengendalian gulma lebih ramah lingkungan. Sorgum (*Sorghum bicolor* L. Moench), khususnya, memiliki eksudat alelopati yang sangat merepotkan gulma dari sorgum. Penelitian ini berfokus untuk menganalisis alelopati kimiawi dari ekstrak akar raton sorgum dan untuk mengidentifikasi senyawa kandidat bioherbisida pada akar dengan menggunakan analisis Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Sorgum diekstrak dengan metode maserasi dingin yang diperoleh dari campuran pelarut yang berbeda konfigurasi. Kemudian, melalui GC-MS pelarut diekstrak dan senyawa yang terpisahkan. Hasilnya, melalui analisis GC-MS, teridentifikasi sebanyak 20 senyawa, yang sebagian besar terdeteksi ke dalam kelompok steroid, sterol, serta turunan asam lemak. Senyawa yang paling unggul terdeteksi yaitu 4, 22-stigmastadien-3-on

(20,74%); stigmasterol (total 16,47%); cholest-4-en-26-oic acid, 3-oxo- (11,68%); dan 9-octadecenamide (Z) (7,69%). Beberapa senyawa polar, seperti 9-octadecenamide (Z) dan turunan sikloheksanol, memiliki kemampuan yang sangat baik. Oleh karena itu, ekstrak akar ratun sorgum mempunyai senyawa alelokimia yang berpotensi bioherbisida yang tersedia secara berkelanjutan serta ramah lingkungan.

Kata kunci: alelopati; bioherbisida; GC-MS; akar ratun; sorgum.

PENDAHULUAN

Pelaksanaan pengendalian gulma dalam sistem pertanian modern harus dihadapi mengingat gulma dapat mengakibatkan hilangnya produktivitas tanaman budidaya secara drastis karena bersaing dalam mendapatkan unsur hara, air, cahaya, serta ruang tumbuh. Selama beberapa dasawarsa, pengendalian gulma masih mengandalkan herbisida sintetis. Namun, dampak negatifnya mulai dari pencemaran, dampak negatif bagi kesehatan, serta kemunculan resistensi pada berbagai spesies gulma semakin mengemuka, akibatnya penggunaan herbisida kimia secara luas dan berulang. (Indarwati et al., 2023). Hal ini kemudian mendorong perlunya pengembangan strategi pengendalian gulma yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Bioherbisida berbasis senyawa alami, terutama alelokimia, sudah mulai mendapatkan perhatian. Pendekatan ini didasarkan pada konsep alelopati, yaitu fenomena biologis di mana suatu organisme menghasilkan senyawa biomolekul yang dapat memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan organisme lain di sekitarnya baik positif maupun negatif (Susilo et al., 2024). Beberapa peneliti menyebutkan alelokimia yang dihasilkan tanaman berfungsi sebagai herbisida alami karena meskipun bersifat biodegradable, mekanisme penghambatan yang ditawarkan masih sejalan dengan banyak herbisida sintesis yang beredar di pasaran dan lebih ramah lingkungan serta pada pengendalian gulma tidak memunculkan resistensi (Amrullah et al., 2024; Mudaningrat et al., 2023).

Banyak penelitian telah melaporkan bahwa ekstrak dari spesies tertentu mengandung polifenol dan metabolit sekunder lainnya yang menghambat perkecambahan dan efektif dalam pertumbuhan gulma serta memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai bio-herbisida (Indarwati et al., 2023). Penerapan alelopati sebagai strategi pengendalian gulma dianggap sebagai pendekatan inovatif yang tidak hanya

mengurangi ketergantungan pada herbisida kimia, tetapi juga secara ekonomi lebih layak dan sejalan dengan pertanian berkelanjutan (Indarwati et al., 2023; Najib et al., 2025). Bioherbisida yang berasal dari metabolit sekunder tanaman atau mikroorganisme diyakini ramah lingkungan dan aman bagi kesehatan manusia dan karenanya memiliki potensi besar untuk aplikasi yang luas (Talahatu & Papilaya, 2015).

Dalam konteks tanaman alelopati, sorgum (*Sorghum bicolor* L. Moench) telah ditetapkan sebagai salah satu tanaman dengan potensi alelopati yang kuat. Tanaman ini mampu menghasilkan berbagai biomolekul alelokimia melalui akar, batang, dan bijinya, yang memengaruhi pertumbuhan tanaman lain di sekitarnya. Pelepasan alelokimia pada sorgum dapat terjadi melalui beberapa mekanisme, seperti eksudasi akar, volatilisasi, pencucian oleh hujan, dan dekomposisi sisa tanaman, yang secara efektif menekan pertumbuhan gulma tertentu dalam agroekosistem (Hussain et al., 2021).

Secara khusus, sorgum dikenal menghasilkan sejumlah alelokimia penting, seperti p-benzoquinone hidrofobik, senyawa fenolik, dan glikosida sianogenik. Dari semua senyawa yang terdeteksi dalam eksudat akar sorgum, sekitar 90% dari total kandungan alelokimia diekstraksi dari eksudat akar sorgum dalam bentuk sorgoleon dan 1,4-dihidroksinya (Kostina-Bednarz et al., 2023). Sorgoleon adalah biomolekul hidrofobik yang diekskresikan oleh akar sorgum dan mempunyai aktivitas penghambatan pertumbuhan gulma yang sangat kuat. Senyawa ini mempunyai stabilitas kimia yang memungkinkan senyawa ini diformulasikan sebagai herbisida yang ramah lingkungan (Cheng & Cheng, 2015; Naby & Ali, 2021).

Saat pertumbuhan sorgum setelah panen, ada keunikan akar ratun sorgum, di mana akar ini dapat terus aktif menghasilkan eksudat akar. Sorgoleon, dalam hal ini, aktif sebagai

penghambat yang bersifat herbisida. Sorgoleon, berdasarkan beberapa penelitian, dapat berkontribusi sebesar 80–95% dari total eksudat akar. Sorgoleon juga diduga mempunyai mekanisme penghambatan evolusi oksigen yang menyerupai diuron (Sangeetha & Baskar, 2015). Oleh karena itu, keunikan ini menjadikan akar ratun sorgum sebagai objek yang berpotensi untuk diteliti dan dikembangkan sebagai bioherbisida berbasis alelopati (Cheema, 2020). Sampai saat ini, meskipun laporan potensi alelopati sorgum sudah banyak, untuk akar ratun sorgum, khususnya yang tumbuh setelah panen utama, masih teridentifikasi dalam komposisi alelokimia yang lebih dalam, meskipun sudah banyak laporan tentang hal itu.

Penelitian yang berfokus pada efek alelopati dalam studi-studi sebelumnya telah dilakukan pada efek alelopati secara umum sementara profil senyawa bioaktif secara rinci, terutama untuk senyawa kandidat bioherbisida potensial baru, masih terbatas (Anwar et al., 2021). Pemahaman tentang komposisi metabolit sekunder harus menjadi prasyarat untuk memahami secara komprehensif kimia di balik aktivitas bioherbisida.

Analisis fitokimia berbasis kromatografi dan metabolomik telah berhasil menunjukkan hubungan antara fitotoksisitas ekstrak tanaman dan potensi antioksidannya, khususnya berkaitan dengan kandungan senyawa fenolik dan metabolit utama lainnya. Dalam hal ini, pendekatan metabolomik yang berbasis Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) adalah metode yang paling sesuai berkat kemampuannya untuk memisahkan dan mengidentifikasi keberadaan senyawa volatil dan semi-volatil dalam campuran yang kompleks (Guntoro et al. 2020). Metode ini telah diterapkan secara luas dalam identifikasi metabolit sekunder termasuk asam fenolik, flavonoid, dan alkaloid yang berperan dalam alelopati (Anwar et al., 2021).

Dengan latar belakang ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara rinci profil senyawa alelokimia dari ekstrak akar *Sorghum bicolor* menggunakan GC-MS dan untuk mengidentifikasi serta mengkaraktirasi senyawa bioaktif yang dapat dikembangkan sebagai bioherbisida. Penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan pengetahuan

mengenai senyawa alelokimia spesifik di akar sorgum ratun dan memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk mengembangkan bioherbisida yang efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan sebagai alternatif untuk herbisida sintetis (Anwar et al., 2021; Jabeen et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dari Juli hingga September 2023 di Lahan Rawa milik Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu dan analisis GC-MS dilakukan di Laboratorium Kesehatan DKI Jakarta.

Bahan baku utama (berangkasan) untuk penelitian ini adalah akar sorgum ratun yang diperoleh dari lahan rawa milik Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu. Akar ratun dipilih sebagai objek penelitian karena sistem akar tanaman ini diyakini menghasilkan eksudat akar dan metabolit sekunder yang diketahui berperan dalam mekanisme alelopati terhadap tanaman lain.

Peralatan penelitian utama yang digunakan meliputi oven pengering, blender, ayakan, evaporator rotary, dan instrumen Kromatografi Gas-Spektrometri Massa (GC-MS) untuk analisis senyawa kimia.

Persiapan Sampel dan Ekstraksi

Persiapan sampel dimulai dengan mencuci akar sorgum ratun dengan air mengalir untuk menghilangkan kotoran dan kontaminan. Sampel kemudian dikeringkan di oven pada suhu 70°C sampai mencapai berat tetap untuk mengurangi kandungan air sambil menghindari degradasi senyawa termolabil yang sensitif terhadap suhu tinggi.

Sampel yang telah dikeringkan di-blender dan diayak hingga 40 mesh. Tujuan dari pengurangan ukuran partikel ini adalah untuk meningkatkan luas permukaan material, sehingga meningkatkan efisiensi kontak antara sampel dan pelarut selama proses ekstraksi. Ekstraksi dilakukan menggunakan metode makerasi dingin bertahap, yang dipilih karena metode ini efektif untuk mengekstraksi metabolit sekunder tanpa merusak struktur senyawa bioaktif. Sampel bubuk direndam dalam pelarut dengan rasio 1:10 (b/v).

Proses makerasi dilakukan secara berturut-turut menggunakan n-heksana, etil asetat, dan etanol selama 3×24 jam, dengan penggantian pelarut setiap 24 jam untuk memaksimalkan ekstraksi solut (Tukiran et al., 2020; Roanisca et al., 2019). Filtrat dari setiap langkah makerasi disaring menggunakan Whatman No.1. Selanjutnya, ekstrak tersebut diperkonsentrasi menggunakan rotary evaporator pada temperatur 40°C untuk mendapatkan ekstrak kental. Sebelum analisis lanjutan menggunakan GC-MS, ekstrak yang dihasilkan disimpan pada temperatur rendah di dalam wadah yang tertutup rapat.

Analisis GC-MS

Analisis senyawa fitokimia dalam ekstrak akar sorgum ratun menggunakan instrumen Shimadzu QP-2010S MS GC dalam mode ionisasi elektron pada 70 eV (Rahmawati et al., 2022). Mode ionisasi ini dipilih karena menghasilkan pola fragmentasi yang khas dan informatif untuk tujuan identifikasi senyawa. Pemindaian untuk rentang massa dilakukan dari 50 hingga 650 m/z untuk mengidentifikasi senyawa volatil dan semi-volatil yang ada dalam ekstrak (Yuan et al., 2017). Kolom kapiler DB-5 MS ($30\text{ m} \times 0,25\text{ mm ID} \times 0,25\text{ }\mu\text{m}$ ketebalan film) yang mengandung 5% fenil methyl polisiloksan fase diam, yang banyak digunakan untuk analisis senyawa organik kompleks, digunakan dalam penelitian ini (Ferdosi et al., 2023).

Suhu oven GC diprogram untuk memulai pada 50°C dan ditahan selama 2 menit, kemudian dinaikkan ke 300°C dengan laju 10°C per menit dan ditahan selama 10 menit. Suhu injektor diatur pada 280°C , dan 250°C pada antarmuka MS, dengan helium sebagai gas pembawa pada laju 1 mL/menit. Untuk menjaga kestabilan sistem dan resolusi pemisahan senyawa, injeksi sampel dilakukan pada mode split 1:10 dan volume injeksi 1 μL (Othman et al., 2021).

Proses identifikasi senyawa dilakukan dengan mencocokkan spektrum massa dan waktu retensi ke masing-masing puncak kromatogram pada pustaka National Institute of Standards and Technology (NIST) dan Wiley yang tersimpan pada GC-MS (Surahmaida et al., 2019). Proses identifikasi ini dilakukan dengan mencocokkan pola, fragmentasi ion, dan retensi indeks

senyawa yang dianalisis, ditambah dengan berat molekul (Saragih, 2024).

Analisis Data

Jumlah komposisi senyawa kimia pada masing-masing ekstrak ditentukan dengan area puncak yang diperoleh pada kromatogram GC-MS, dan sebanding dengan performa relatif jumlah masing-masing senyawa yang terkandung dalam sampel (Rafi et al., 2018). Pendekatan ini digunakan untuk memberikan pemahaman mengenai profiling senyawa secara kuantitatif dalam skala relatif.

Hasil analisis kromatogram dengan GC-MS digunakan untuk mengetahui jumlah dan jenis senyawa yang dapat berkontribusi sebagai senyawa alelopati pada ekstrak akar ratun sorgum, baik yang dominan maupun yang minor (Rumanti & Saragih, 2023). Senyawa yang telah teridentifikasi selanjutnya dikelompokkan berdasarkan pada struktur kimianya dan potensi aktivitas biologi. Klasifikasi ini digunakan sebagai dasar untuk interpretasi dalam menentukan kandidat senyawa kimia yang mungkin bertindak dalam mekanisme alelopati sorgum (Surahmaida et al., 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis menggunakan kromatografi gas-spektrometri massa (GC-MS) pada ekstrak akar rumput sorgum menunjukkan adanya 20 senyawa kimia, sebagian besar termasuk dalam kelompok senyawa steroid/sterol dan turunan steroid teroksidasi, diikuti oleh senyawa turunan asam lemak dan satu senyawa alkohol. Senyawa dengan jumlah yang relatif lebih tinggi termasuk 4,22-Stigmastadien-3-on (20,74%), Stigmasterol (13,04% dan 3,43%), serta Cholest-4-en-26-asam oik, 3-oxo- (11,68%). Selain itu, senyawa 9-Octadecenamide (Z) (7,69%), dan Cyclohexaneethanol, 4-metil- β -metilen-, trans- (5,12%), terdeteksi. Kehadiran senyawa-senyawa ini menunjukkan potensi sebagai alelokimia dari ekstrak akar rumput sorgum, mengingat beberapa, seperti stigmasterol, dilaporkan memiliki beberapa aktivitas biologi yang menarik bagi interaksi tanaman-mikroba (Wijaya et al., 2023).

Selain senyawa steroid dan alkohol, analisis GC-MS juga mengungkapkan adanya berbagai

asam lemak dan turunan mereka, termasuk asam 9,12-octadecadienoic, vitamin E, dan ester etil asam linoleat, yang bersama-sama menyumbang sekitar 85% dari total komposisi ekstrak. Ini adalah ungkapan dari berbagai konstituen fitokimia dalam ekstrak akar ratun sorgum (Ajani et al., 2021). Asam 9,12-octadecadienoic, yang juga dikenal sebagai asam linoleat, adalah asam lemak polinsaturasi esensial yang ditemukan dalam ekstrak tumbuhan dan dilaporkan memiliki berbagai aktivitas biologi termasuk aktivitas alelopatik dan antimikroba. Asam lemak lain, termasuk asam n-hexadecanoic dan asam oleat, juga telah diidentifikasi sebagai konstituen penting dari ekstrak tumbuhan dan dilaporkan memiliki aktivitas alelopatik, terutama dalam penghambatan mikroorganisme.

Tabel 1. Senyawa teridentifikasi kandidat sebagai bioherbisida larut air

No	Senyawa	Golongan	Kadar (%)	RT (menit)	Alasan dipilih
1	9-Octadecanamide, (Z)	Asam lemak	7,69	30,720	Amida (lebih polar dibanding hidrokarbon/alkana); berpotensi mengganggu membran & perkecambahan
2	Cyclohexanethanol, 4-methyl- β -methylene-, trans-	Alkohol/fenolik	5,12	43,476	Mengandung -OH $\rightarrow$ peluang paling besar untuk "larut air"; kandidat kuat bioherbisida cair
3	1,2-Benzene dicarboxylic acid, mono (2-ethylhexyl) ester	Ester	4,84	31,292	Senyawa aromatik beroksigen (lebih reaktif); dapat berkontribusi pada penghambatan (walau kelarutan air bisa terbatas)

Keterangan : Diharapkan bahwa kandidat utama berasal dari senyawa polar hingga semi-polar dengan kelompok fungsional polar yang bersifat fitotoksik, tetapi karena GC-

MS cenderung mendeteksi senyawa semi-polar hingga non-polar, klaim berikatan dengan fraksi air masih memerlukan validasi melalui pengujian pembagian atau fraksinasi lebih lanjut.

Studi sebelumnya juga melaporkan kehadiran γ -sitosterol sebagai senyawa penghambat yang signifikan, namun, kontribusinya secara keseluruhan terhadap efek alelopatik belum dikonfirmasi (Gam et al., 2024). Ini konsisten dengan berbagai studi GC-MS pada ekstrak akar tanaman lain, seperti *Humulus scandens* dan *Melastoma malabathricum*, yang melaporkan kehadiran senyawa yang sama, termasuk metil palmitat, n-hexadecanoat, dan asam 9,12-octadecadienoic. Kesamaan dalam profil ini menunjukkan bahwa jenis asam lemak ini adalah konstituen fitokimia dari ekstrak tumbuhan yang tersedia luas dengan potensi bioaktif yang luas.

Selain asam lemak, skualen dan D-alpha-tokoferol juga ditemukan dalam ekstrak akar ratun sorgum. Skualen dikenal sebagai senyawa yang termasuk dalam kelas terpenoid dengan berbagai aktivitas biologi, sementara D-alpha-tokoferol adalah vitamin E yang penting sebagai antioksidan. Senyawa lain, seperti isomer nerolidol, viridiflorol, dan dotriacontanol, memperkaya kompleksitas fitokimia dari ekstrak, dengan masing-masing berbeda dalam karakteristik kimianya dan potensi bio-aktivitas (Agarwal et al., 2017). Kehadiran asam 9,12-octadecadienoic, asam 9,12,15-octadecatrienoic, dan ester etil asam oktadecanoic mengkonfirmasi dominansi kelompok asam lemak, yang dikenal memiliki aktivitas antimikroba dan antiinflamasi, sehingga lebih memperkuat potensi alelopati dari ekstrak sorgum.

Temuan metil hexadecanoate dan etil linoleate, serta senyawa phytol, yang didokumentasikan memiliki potensi bioaktivitas termasuk alelopati dan aktivitas antioksidan (Dalar et al., 2018; Delecolle, 2017), memperkaya profil kemotaksonomi dari ekstrak. Pemeriksaan senyawa yang lebih kecil seperti heptadekana, eikosana, dan tetracosamethyl cyclododecasiloxane juga relevan untuk pemahaman kontribusi kumulatif terhadap aktivitas alelokimia dari ekstrak secara keseluruhan (Ismaini & Surya, 2023). Senyawa lain, termasuk 2,6-Di-tert-butylphenol,

campesterol, dan dibutil ftalat, telah didokumentasikan memiliki aktivitas alelopatik pada pertumbuhan tanaman dan mikroorganisme. Ekstrak juga mengandung asam n-hexadecanoic atau asam palmitat, yang dilaporkan memiliki aktivitas insektisida dan antiandrogenik serta menghambat 5- α reduktase, sehingga lebih memperkuat potensi ekstrak sorgum sebagai agen alelokimia.

Tabel 2. Senyawa teridentifikasi yang kemungkinan fitotoksik

Kelompok	Senyawa	Kadar (%)	Catatan relevansi
Ester asam lemak	Hexadecanoic acid, ethyl ester (1,09); Tetradecanoic acid, ethyl ester (2,04); Methyl 17-methyl-octadecanoate (1,43); Ethyl oleate (1,39)	1–2%	Umumnya hidrofobik; bisa menjadi prekursor asam lemak bebas di lingkungan
Steroid/sterol & steroid keton/asam	Campesterol (7,69), Stigmasterol (13,04 + 3,43), Cholestan-3-one (2,80), Cholest-4-en-26-oic acid, 3-oxo- (11,68), 4,22-Stigmastadiene-3-one (20,74), dll.	tinggi	Potensi fitotoksik/alelopatik ada, tapi lebih cocok untuk fraksi non-polar atau formulasi berbasis emulsi

Kehadiran δ -tokoferol dan skualena semakin mendukung potensi antioksidan dan neuroprotektif dari ekstrak, di mana skualena dilaporkan memiliki aktivitas antibakteri, antitumor, dan imunostimulan. Senyawa lain, termasuk 1-oktakosanol dan 3-O-metil-D-glukosa, juga bersifat bioaktif, di mana 1-oktakosanol dikenal karena aktivitas

insektisidalnya dan 3-O-metil-D-glukosa dilaporkan memiliki aktivitas pengawet (Ahmed et al., 2023). Secara keseluruhan, spektrum luas fitokimia ini menunjukkan bahwa ekstrak akar sorgum ratun adalah sumber senyawa bioaktif dengan potensi yang beragam, terutama dalam konteks alelopati, pertanian, dan farmasi.

Saat mengembangkan bioherbisida berdasarkan ekstrak yang larut dalam air, fokus utama telah diarahkan pada senyawa yang mengandung grup fungsi polar, seperti –OH, –CONH–, atau karbonil teroksidasi, karena senyawa ini lebih mungkin berada di fraksi air dan lebih mudah berinteraksi dengan jaringan tanaman target, terutama biji dan akar muda. Berdasarkan profil GC-MS yang diperoleh, senyawa paling menjanjikan dalam kategori ini adalah turunan Sikloheksanol (5,12%) dan 9-Oktadecenamid (Z) (7,69%). Kedua senyawa ini memiliki grup polar yang mendukung aktivitas biologis dengan mengganggu integritas membran sel, menghambat perpanjangan akar, dan mengganggu proses fisiologis awal perkecambahan.

Tabel 3. Senyawa teridentifikasi yang tidak diprioritaskan untuk bioherbisida larut air (hidrofobik murni)

Senyawa	Golongan	Kadar (%)	Alasan tidak diprioritaskan
1-Octadecene	Hidrokarbon	2,24	Hidrofobik, kontribusi fitotoksik langsung kecil
Trans-4,4-Dimethyl-2-hexene	Hidrokarbon	1,64	Hidrofobik
1-Docosane	Alkana	1,08	Hidrofobik kuat

Selain senyawa polar, perhatian juga diberikan kepada 2-hidroksi-5-metoksi-3-p-hidroquinone, komponen hidrofobik dari eksudat akar sorgum yang dapat dioksidasi menjadi sorgoleone, sebuah kuinon stabil yang dikenal sebagai alelokimia kunci dari sorgum. Gangguan jalur fotosintesis dan respirasi yang disebabkan oleh Sorgoleone secara signifikan menghambat pertumbuhan akar selada dan berbagai spesies gulma (Naby & Ali, 2021; Akondo et al., 2024). Selain Sorgoleone, p-benzoquinon, senyawa fenolik, dan glikosida a-siyanogenik juga

dilaporkan sebagai komponen hidrofobik utama sorgum dan menunjukkan efek alelopatik yang signifikan (Kostina-Bednarz et al., 2023). Secara khusus, Sorgoleone telah diformulasikan sebagai herbisida alami, dengan gulma berdaun lebar lebih rentan dibandingkan gulma tipe rumput (Uddin et al., 2013).

Studi metabolomik lanjutan telah mengidentifikasi setidaknya lima belas metabolit alelopatik tambahan, termasuk dipeptida asam amino, C18 oksilipin, malonil monoglikosida, dan dua furanokumarin, xanthotoxin dan bergapten, yang berkontribusi pada variasi metabolik dan fenotipik yang beragam dari sorgum (Barrales-Cureño et al., 2022). Senyawa-senyawa ini, bersama dengan Sorgoleone, memiliki potensi sinergis dalam mengganggu berbagai proses fisiologis dari gulma target, mulai dari penghambatan perkecambahan hingga gangguan fotosintesis dan respirasi. Selain itu, senyawa seperti propanamida, benzamida, dan beberapa turunan pirimidin yang teridentifikasi dalam ekstrak sorgum juga diketahui memiliki aktivitas herbisida pasca-percambahan yang efektif dalam menghambat fotosintesis baik pada gulma monokotil maupun dikotil (Anwar et al., 2021).

Komposisi kimia multifaset dari eksudat akar sorgum, terutama keberadaan sorgoleone dan berbagai senyawa fenolik, mengonfirmasi potensi besar sorgum sebagai bioherbisida yang berkelanjutan dan pilihan yang ramah lingkungan dalam sistem pengelolaan gulma terpadu (Cheng & Cheng, 2015). Keragaman alelokimia bekerja dengan mengganggu jalur biokimia penting, seperti fotosintesis dan respirasi mitokondria pada tanaman target, sehingga menyediakan mekanisme pengendalian gulma yang kompleks dan efektif (Albuquerque et al., 2010). Interaksi biokimia yang kompleks ini memposisikan sorgum sebagai kandidat utama untuk pengembangan sistem pengendalian gulma berbasis produk alami sebagai alternatif untuk herbisida sintesis konvensional (Hierro & Callaway, 2021; Waligóra et al., 2024).

Asam 1,2-benzenedicarboxylic, mono (2-etilheksil) ester (4,84%) juga dipandang sebagai kandidat bioherbisida potensial, terutama mengingat keberadaan struktur aromatik, yang sering kali terkait dengan aktivitas biologis. Namun, karena merupakan ester dengan rantai

alifatik panjang, diasumsikan memiliki kelarutan dalam air yang terbatas. Dengan demikian, lebih tepat untuk mengkategorikannya sebagai kandidat potensial dari kelas perantara yang memerlukan validasi lebih lanjut dalam fraksi akuatik atau modifikasi formulasi untuk meningkatkan bioavailabilitasnya. Di sisi lain, kelompok alkaloid, flavonoid, dan terpenoid, yang juga umum ditemukan dalam alelokimia tanaman, patut mendapat perhatian lebih lanjut karena telah dilaporkan mempengaruhi pertumbuhan biji dan aktivitas meristematis sel pada berbagai spesies tanaman (Anwar et al., 2023; Cheema, 2020).

Dominasi kelompok steroid dan sterol seperti stigmasterol, campesterol, dan turunan steroid serta keton asam, menunjukkan bahwa ekstrak akar sorgum juga kaya akan komponen semi-polar hingga non-polar. Inhibisi efek pertumbuhan, bagaimanapun, sering kali tidak cocok untuk aplikasi dengan bioherbisida berbasis air tanpa strategi formulasi tambahan, seperti emulsi, atau penambahan surfaktan tanaman. Oleh karena itu, untuk pengembangan bioherbisida berbasis air, pendekatan yang lebih rasional adalah memfokuskan pengujian bioassay pada fraksi polar dan membandingkannya dengan fraksi non-polar untuk menentukan fraksi yang paling aktif terhadap gulma yang ditargetkan.

Analisis komparatif semacam ini sangat penting untuk mengoptimalkan protokol ekstraksi, strategi formulasi, dan untuk mengidentifikasi fitotoksin spesifik seperti alkaloid, asam fenolik, dan flavonoid yang merupakan komponen paling aktif dalam mekanisme alelopati (Anwar et al., 2021; Barrales-Cureño et al., 2022). Pemahaman tentang jalur biokimia yang terlibat dalam fenomena alelopati juga memerlukan pendekatan metabolomik dan proteomik yang lebih mendalam untuk mengungkap biosintesis dan interaksi sinergis di antara senyawa alelokimia (Barrales-Cureño et al., 2022). Penelitian lebih lanjut juga perlu menilai potensi fitotoksitas pada tanaman serta dampaknya terhadap mikroflora tanah dan organisme non-target, untuk memastikan keamanan dan keberlanjutan aplikasi bioherbisida alami berbasis sorgum dalam sistem pertanian berkelanjutan (Freitas et al., 2019; Flieller, 2022).

Untuk mendukung secara lebih meyakinkan bahwa ekstrak akar sorgum ratun memiliki potensi sebagai bioherbisida, serangkaian uji yang lebih langsung secara operasional perlu dilakukan. Tahap awal dan paling mendasar dari proses ini melibatkan pelaksanaan fraksinasi sederhana berdasarkan polaritas dengan memisahkan komponen polar (yang merupakan fraksi air) dari non-polar (yang merupakan fraksi asetat etil/n-heksana). Tujuan pendekatan jenis fraksinasi ini adalah untuk memetakan senyawa aktif menurut polaritasnya, sehingga memungkinkan identifikasi kandidat yang lebih tepat yang mungkin hadir dalam fraksi yang larut dalam air.

Dari sudut pandang teknis, fraksinasi dapat dilakukan dengan mempartisi ekstrak metanol terkonsentrasi menggunakan n-heksana dan asetat etil untuk memperoleh fraksi yang berbeda yang mewakili kelompok senyawa dari non-polar ke semi-polar (Iryani et al., 2017). Setelah fraksi-fraksi tersebut diperoleh, masing-masing dari fraksi ini harus diuji lebih lanjut untuk menentukan alelokimia dan menilai potensi aktivitas herbisida mereka, sehingga membuat pemilihan aktivitas lebih terdefinisi di luar ekstrak kasar umum ke fraksi spesifik dan lebih aktif (Irmawan et al., 2018). Dengan demikian, fraksinasi adalah proses yang menyederhanakan kompleksitas campuran fitokimia sebelum pengujian bioaktivitas yang lebih terarah.

Tahap berikutnya melibatkan mengintegrasikan fraksinasi dengan penilaian bioaktivitas (fraksinasi yang dipandu bioassay). Pengujian toksisitas, seperti Uji Kematian Ulang Garam, dapat dilakukan pada fraksi untuk mendapatkan indikasi awal aktivitas biologi yang dapat membantu memandu proses isolasi lebih lanjut menuju senyawa murni (Irmawan et al., 2018). Strategi ini memungkinkan untuk lebih spesifik menentukan senyawa aktif, serta meningkatkan pemahaman tentang efek yang diberikan oleh setiap fraksi terhadap efek bioherbisida yang diamati (Desianti, 2014). Strategi ini memungkinkan proses pemilihan lebih terfokus pada bioaktivitas daripada asumsi konstituen kimia. Jika fraksi yang paling aktif diperoleh, disarankan agar langkah selanjutnya adalah melakukan pemurnian lebih lanjut, seperti melalui kromatografi kolom, untuk memisahkan senyawa individu dari fraksi tersebut.

Analisis senyawa murni dapat dilakukan menggunakan teknik seperti UV-Vis, FT-IR, MS, dan NMR untuk mengonfirmasi secara ilmiah identitas molekul bioaktif (Jemi et al., 2019). Pemisahan berbasis HPLC yang dikombinasikan dengan bioassay juga dapat digunakan secara paralel untuk menemukan molekul aktif dalam fraksi, terutama dalam ekstrak kuat seperti fraksi asetat etil dan etanol, seperti yang ditunjukkan dalam uji pertumbuhan bibit dan radikel (Flieller, 2022). Kombinasi pendekatan fraksinasi-bioassay-isolasi ini adalah proses sistematis yang memperkuat validitas studi karena senyawa fitotoksik yang paling dominan dapat diidentifikasi dan dikarakterisasi secara akurat (Duke, 2015).

Untuk mendemonstrasikan aktivitas herbisida, bioassay perkecambahan biji dan pertumbuhan radikula, yang menunjukkan efek alelopati, perlu dilakukan, karena mereka menunjukkan bukti tentang dampak herbisida difusi pada tahap awal pertumbuhan pada tanaman target. Dalam praktiknya, bioassay dilakukan dengan mengekspos biji atau bibit gulma target, ke berbagai konsentrasi fraksi atau senyawa murni, dan mengamati efeknya pada persentase perkecambahan, pertumbuhan akar, dan perkembangan tunas (Flieller, 2022). Desain tes semacam itu harus dihargai karena tahap perkecambahan adalah yang paling rentan terhadap senyawa alelokimia.

Akhirnya, untuk membuat argumen yang kuat dan secara kuantitatif mendemonstrasikan efektivitas produk sebagai 'bioherbisida', perlu dilakukan studi dosis-respons yang diukur. Eksperimen dosis respons berguna untuk menetapkan tingkat efektivitas dan potensi dari suatu alelokimia yang mencakup parameter seperti konsentrasi efektif dan ambang penghambatan pertumbuhan (Biswas, 2017). Pendekatan komprehensif yang menggabungkan fraksinasi terpandu bioassay, karakterisasi kimia yang tepat, dan analisis respons dosis merupakan prasyarat penting untuk memvalidasi potensi alelopatik dan memperkuat klaim bioherbisida yang larut dalam air (Boonmee & Kato-Noguchi, 2017). Dalam hal efisiensi bahan, pengembangan fraksinasi terpandu bioassay, yang dipadu dengan pengujian antigerminatif dan pemisahan HPLC, juga dapat mengidentifikasi molekul

aktif, bahkan dengan bahan baku yang terbatas, terutama ekstrak yang kompleks (Flieller, 2022).

Pemilihan pelarut untuk fraksinasi harus mencerminkan polaritas alelokimia yang diduga dominan dan karakteristik gulma target, sehingga pemisahan optimal dan aktivitas biologis dimaksimalkan. Selain itu, efektivitas bioherbisida kandidat dapat ditingkatkan melalui penjelajahan potensi sinergi dengan strategi pengelolaan gulma lainnya dalam konteks pertanian berkelanjutan. Namun, perlu dicatat bahwa hasil tes laboratorium tidak selalu sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan karena interaksi biotik dan abiotik yang lebih kompleks, jadi validasi dalam kondisi semi-lapangan dan lapangan tetap merupakan langkah penting sebelum aplikasi secara luas (Freitas et al., 2019).

KESIMPULAN

Ekstrak dari akar sorgum mengandung berbagai fitokompound bioaktif alelopati potensial menunjukkan bahwa bagian tanaman ini memiliki kemungkinan untuk dikembangkan menjadi sumber bioherbisida alami. Dominasi senyawa steroid/sterol dan turunan asam lemaknya menunjukkan bahwa ada beberapa jalur potensial dari fitokompound bioaktif yang bertanggung jawab atas potensi alelopati.

Implikasi praktis dari hasil ini adalah terbukanya kemungkinan penggunaan baru untuk akar sorgum sebagai bioherbisida, yang akan mengurangi ketergantungan pada herbisida sintetik dan mempromosikan praktik pertanian yang lebih berkelanjutan. Selain itu, penggunaan akar sorgum juga dapat meningkatkan nilai terintegrasi dari penambahan sistem pemanfaatan sorgum.

Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan fraksinasi ekstrak berbasis bioassay guna mengidentifikasi senyawa alelokimia paling aktif, serta uji fitotoksitas terhadap gulma target dan tanaman budidaya. Selain itu, pengembangan formulasi yang stabil dan ramah lingkungan serta evaluasi dampaknya terhadap organisme non-target perlu dilakukan sebelum aplikasi pada skala lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, A., Prajapati, R., Raza, S. K., & Thakur, L. K. (2017). GC-MS analysis and antibacterial activity of aerial parts of *Quisqualis indica* plant extracts. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 51(2), 329–336. <https://doi.org/10.5530/ijper.51.2.39>
- Ahmed, V. A., Rahman, H. S., & Mohammed, M. O. (2023). Phytochemical analysis and *in vivo* toxicity study of *Dianthus orientalis* Adams crude extract. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3059711/v1>
- Ajani, O. O., Owoeye, T. F., Akinlabi, K. D., Bolade, O. P., Aribisala, O., & Durodola, B. (2021). Sorghum extract: Phytochemical, proximate, and GC-MS analyses. *Foods and Raw Materials*, 9(2), 371–378. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-371-378>
- Akondo, S., Ahmed, M. T., Uddin, M. R., & Sarker, U. K. (2024). Combined application of herbicide and aqueous extract of sorghum and mustard crop residue enhance weed management and yield of wheat. *Journal of Agroforestry and Environment*, 17(2), 1–8. <https://doi.org/10.55706/jae1710>
- Albuquerque, M. B. de, Santos, R. C. dos, Lima, L. M. de, Filho, P. de A. M., Nogueira, R. J. M. C., Câmara, C. A. G. da, & Ramos, A. (2010). Allelopathy, an alternative tool to improve cropping systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(2), 379–395. <https://doi.org/10.1051/agro/2010031>
- Amrullah, R., Indarwati, I., & Susilo, A. (2024). Allelopathy test of *Cyperus rotundus* extract on germination and early growth of spiny amaranth weed (*Amaranthus spinosus*). *Journal of Applied Plant Technology*, 3(2), 137–145. <https://doi.org/10.30742/6zjn2m95>
- Anwar, S., Naseem, S., & Ali, Z. (2023). Biochemical analysis, photosynthetic gene (*psbA*) down-regulation, and *in silico* receptor prediction in weeds in response to exogenous application of phenolic acids and their analogs. *PLoS ONE*, 18(3), e0277146. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277146>

- Anwar, S., Naseem, S., Karimi, S., Asi, M. R., Akrem, A., & Ali, Z. (2021). Bioherbicidal activity and metabolic profiling of potent allelopathic plant fractions against major weeds of wheat—Way forward to lower the risk of synthetic herbicides. *Frontiers in Plant Science*, 12, 632390. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.632390>
- Barrales-Cureño, H. J., Herrera-Cabrera, B. E., Montiel-Montoya, J., López-Valdez, L. G., Salgado-Garciglia, R., Ocaño-Higuera, V. M., Sánchez-Herrera, L. M., Lucho-Constantino, G. G., & Zaragoza-Martínez, F. (2022). Metabolomics studies of allelopathy: A review. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 51(1), 1–22. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v51n1.102693>
- Biswas, S. M. (2017). Optimized analytical techniques for extraction and separation of bioactive compounds from diverse plant types. *Biochemistry & Analytical Biochemistry*, 6(1), 313. <https://doi.org/10.4172/2161-1009.1000313>
- Boonmee, S., & Kato-Noguchi, H. (2017). Allelopathic activity of *Acacia concinna* pod extracts. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 29, 1–7. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-07-964>
- Cheema, M. W. (2020). Weed control in wheat through different sorghum formulations as an organic herbicide. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 8(2), 129–136. <https://doi.org/10.35495/ajab.2018.09.285>
- Cheng, F., & Cheng, Z. (2015). Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01020>
- Dalar, A., Bengü, A. Ş., & Allahverdiyev, O. (2018). Analysis of phytochemical composition and biological activities of *Verbascum cheiranthifolium* var. *cheiranthifolium* stem and flowers. *International Journal of Secondary Metabolite*, 5(3), 233–245. <https://doi.org/10.21448/ijsm.401127>
- Delecolle, J. (2017). A complementary metabolomics approach to screen metabolic fingerprints of plant extracts used in human health (Doctoral dissertation). HAL. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01559676>
- Desianti, N. (2014). Uji toksisitas dan identifikasi golongan senyawa aktif fraksi etil asetat, kloroform, petroleum eter dan n-heksana hasil hidrolisis ekstrak metanol mikroalga *Chlorella* sp. (Undergraduate thesis). Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Duke, S. O. (2015). Proving allelopathy in crop–weed interactions. *Weed Science*, 63, 121–132. <https://doi.org/10.1614/ws-d-13-00130.1>
- Ferdosi, M. F. H., Khan, I. H., & Javaid, A. (2023). Bioactive components of ethyl acetate extract of *Cassia fistula* flowers. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 33(3). <https://doi.org/10.36899/japs.2023.3.0643>
- Flieller, G. (2022). Innovative characterization method for the research of molecules with an allelopathic potential (Doctoral dissertation). HAL. <https://theses.hal.science/tel-03937412>
- Freitas, M. L. de O., Ricardo, L. L., Zonetti, P. da C., Carvalho, T. F. F. de, Andreola, R., Gonçalves-Zuliani, A. M. O., Mannigel, A. R., Oliveira, J. R. de, Felipe, D. F., Gasparotto, F., Schmidt-Filho, E., & Bido, G. de S. (2019). Control of invasive plants by the phytotoxicity effect of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Journal of Agricultural Science*, 11(10), 313–321. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n10p313>
- Gam, H., Injamum-Ul-Hoque, M., Kang, Y., Ahsan, S. M., Hasan, M. M., Shaffique, S., Kang, S.-M., & Lee, I. (2024). Allelopathic effect of the methanol extract of the weed species red sorrel (*Rumex acetosella* L.) on the growth, phytohormone content and antioxidant activity of the cover crop white clover (*Trifolium repens* L.). *BMC Plant Biology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05240-z>
- Guntoro, D., Rokhmaningsih, D. W., & Nuryana, F. I. (2020). Identification of allelochemical compounds from each part of *Tetracera indica* (L.) Merr. *Rasayan Journal of Chemistry*, 13(4), 2308–2316. <https://doi.org/10.31788/rjc.2020.1345763>

- Hierro, J. L., & Callaway, R. M. (2021). The ecological importance of allelopathy. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 52(1), 25–45. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-051120-030619>
- Hussain, M. I., Danish, S., Sánchez-Moreiras, A. M., Vicente, Ó., Jabran, K., Chaudhry, U. K., Branca, F., & Reigosa, M. J. (2021). Unraveling sorghum allelopathy in agriculture: Concepts and implications. *Plants*, 10(9), 1795. <https://doi.org/10.3390/plants10091795>
- Indarwati, I., Jili, A. Q. A., Susilo, A., & Suryaningsih, D. R. (2023). Potensi alelopati ekstrak gulma alang-alang sebagai bioherbisida. *Journal of Applied Plant Technology*, 2(1), 30–38. <https://doi.org/10.30742/japt.v2i1.77>
- Irmawan, M., Mandey, F., & Dali, S. (2018b). Isolation, identification, characterization, and toxicity assay of non-polar secondary metabolite fraction from *Ageratum conyzoides* L. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 6(1), 513–520. <https://doi.org/10.30598/v12>
- Iryani, I., Iswendi, I., & Katrina, I. T. (2017). Uji aktivitas antidiabetes mellitus senyawa metabolit sekunder fraksi air dari beras ketan hitam (*Oryza sativa* L. var. *glutinosa*) pada mencit putih. *EKSAKTA Berkala Ilmiah Bidang MIPA*, 18(1), 54–60. <https://doi.org/10.24036/eksakta/vol18-iss01/17>
- Ismaini, L., & Surya, M. I. (2023). Metabolite profiling of wild underutilized raspberry (*Rubus pyrifolius*). *Notulae Scientia Biologicae*, 15(4), 11695. <https://doi.org/10.55779/nsb15411695>
- Jabeen, S., Ali, M. F., Din, A. M. U., Javed, T., Mohammed, N. S., Chaudhari, S. K., Javed, M. A., Ali, B., Zhang, L., & Rahimi, M. (2023). Phytochemical screening and allelopathic potential of phytoextracts of three invasive grass species. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35253-x>
- Jemi, R., Damanik, R. D. E., & Indrayanti, L. (2019). Aktivitas larvasida ekstrak daun tumih (*Combretocarpus rotundatus* (Miq.) Danser) terhadap larva *Aedes aegypti*. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 13(1), 77–85. <https://doi.org/10.22146/jik.46208>
- Kostina-Bednarz, M., Płonka, J., & Barchańska, H. (2023). Allelopathy as a source of bioherbicides: Challenges and prospects for sustainable agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 471–495. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09656-1>
- Mudaningrat, A., Indriani, B. S., Istianah, N., Retnoningsih, A., & Rahayu, E. S. (2023). Literature review: Pemanfaatan jenis-jenis *Syzygium* di Indonesia. *Jurnal Biologi dan Pembelajarannya*, 10(2), 135–146. <https://doi.org/10.29407/jbp.v10i2.20815>
- Naby, K. Y., & Ali, K. A. (2021). Allelopathic potential of *Sorghum bicolor* L. root exudates on growth and chlorophyll content of wheat and some grassy weeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 761(1), 012085. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/761/1/012085>
- Najib, A., Budi, G. P., Pribadi, T., & Hajoeningtjas, O. D. (2025). Uji beberapa jenis ekstrak gulma sebagai herbisida nabati terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman terong (*Solanum melongena* L.). *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 8, 149–156. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v8i.1488>
- Othman, A. N., Zainudin, N. F. S., Zaidan, U. H., & Shamsi, S. (2021). A comparative study on the larvicidal effects of *Piper sarmentosum* (Kaduk) leaves extracts against *Aedes aegypti*. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 29(4), 2537–2550. <https://doi.org/10.47836/pjst.29.4.31>
- Rafi, M., Septaningsih, D. A., & Heryanto, R. (2018). Metabolite profiling of Java turmeric (*Curcuma xanthoriza*) essential oil with different harvest times. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 21(4), 237–241. <https://doi.org/10.14710/jksa.21.4.237-241>
- Rahmawati, D., Wirawan, I. G. P., & Sudiarta, I. P. (2022). Identifikasi senyawa fitokimia ekstrak bulung boni (*Caulerpa* sp.) dari Pantai Serangan. *Agrotrop: Journal on Agriculture Science*, 12(2), 295. <https://doi.org/10.24843/ajaoas.2022.v12.i02.p11>

- Roanisca, O., Mahardika, R. G., & Sari, F. I. P. (2019). Total phenolic and antioxidant capacity of acetone extract of *Tristanopsis merguensis* leaves. *Stannum Jurnal Sains dan Terapan Kimia*, 1(1), 10. <https://doi.org/10.33019/jstk.v1i1.1274>
- Rumanti, A. T., & Saragih, H. (2023). Ekstraksi dan identifikasi kandungan senyawa bioaktif daun saga rambat (*Abrus precatorius*). *Journal of Biota*, 8(2), 59. <https://doi.org/10.24002/biota.v8i2.6417>
- Sangeetha, C., & Baskar, P. (2015). Allelopathy in weed management: A critical review. *African Journal of Agricultural Research*, 10(9), 1004. <https://doi.org/10.5897/ajar2013.8434>
- Saragih, H. (2024). Sintesa nanopartikel senyawa bioaktif daun pegagan (*Centella asiatica*) dan uji pengaruh pemanasan dan tekanan terhadap diameter dan indeks polidispersitasnya. *JPSCR Journal of Pharmaceutical Science and Clinical Research*, 9(1), 77. <https://doi.org/10.20961/jpscr.v9i1.74982>
- Surahmaida, S., Sudarwati, T. P. L., & Junairiah, J. (2019). Analisis GC-MS terhadap senyawa fitokimia ekstrak metanol *Ganoderma lucidum*. *Jurnal Kimia Riset*, 3(2), 147. <https://doi.org/10.20473/jkr.v3i2.12060>
- Susilo, B. S. M., Indarwati, I., & Susilo, A. (2024). Allelopathy test of reeds (*Imperata cylindrica*) on germination and early growth of green beans (*Vigna radiata* L.). *Journal of Applied Plant Technology*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.30742/skh42566>
- Talahatu, D. R., & Papilaya, P. M. (2015). Pemanfaatan ekstrak daun cengkeh (*Syzygium aromaticum* L.) sebagai herbisida alami terhadap pertumbuhan gulma rumput teki (*Cyperus rotundus* L.). *Biopendix: Jurnal Biologi Pendidikan dan Terapan*, 1(2), 160. <https://doi.org/10.30598/biopendixvol1issue2page160-170>
- Tukiran, T., Miranti, M. G., Dianawati, I., & Sabila, F. I. (2020). Aktivitas antioksidan ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera* Lam.) dan buah bit (*Beta vulgaris* L.) sebagai bahan tambahan minuman suplemen. *Jurnal Kimia Riset*, 5(2), 113. <https://doi.org/10.20473/jkr.v5i2.22518>
- Uddin, M. R., Park, S. U., Dayan, F. E., & Pyon, J. Y. (2013). Herbicidal activity of formulated sorgoleone, a natural product of sorghum root exudate. *Pest Management Science*, 70(2), 252. <https://doi.org/10.1002/ps.3550>
- Waligóra, H., Nowicka, S., Idziak, R., Ochodzki, P., Szulc, P., Majchrzak, L., & Sekutowski, T. (2024). The total phenolic compound and sorgoleone content as possible indirect indicators of the allelopathic potential of sorghum varieties (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Journal of Plant Protection Research*. <https://doi.org/10.24425/jppr.2023.146869>
- Wijaya, M. D., Indraningrat, A. A. G., & Kirtanayasa, I. G. Y. A. (2023). Phytochemicals and larvicidal activity of *Sonneratia alba* root extracts from Ngurah Rai Mangrove Forest, Denpasar-Bali. *Biology, Medicine & Natural Product Chemistry*, 12(2), 499–505. <https://doi.org/10.14421/biomedich.2023.12.2.499-505>
- Yuan, J., Meng, J., Liang, X., Yang, E., Yang, X., & Chen, W. (2017). Organic molecules from biochar leachates have a positive effect on rice seedling cold tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01624>