

Herbivory-induced Defense Responses in Brassicaceae: Implication on Secondary Metabolites Enrichment and Diversification - A Comprehensive Review

Suci Indah Putri¹, Shyla Aulia Delfi¹, Putra Santoso¹, Resti Rahayu¹, Muhammad Idris^{1*}

¹Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Kampus Universitas Andalas Limau Manis, Padang, Sumatera Barat, 25163, Indonesia;

Article History

Received : December 25th, 2025

Revised : January 10th, 2026

Accepted : January 16th, 2026

*Corresponding Author:

Muhammad Idris,

Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Kampus Universitas Andalas Limau Manis, Padang, Sumatera Barat, 25163, Indonesia;

Email: midris@sci.unand.ac.id

Abstract: Plants of the Brassicaceae family display a highly complex and adaptive chemical defense system against biotic stresses, particularly herbivore attack. These defense mechanisms are physiologically based on the biosynthesis and activation of secondary metabolites, mainly glucosinolates, which are converted into toxic compounds such as isothiocyanates by the enzyme myrosinase upon tissue damage. This response is not only local, but also systemic, involving cross-interactions between roots and leaves, and is modulated by the hormones jasmonate (JA), salicylate (SA), and ethylene (ET). These complex interactions form a plant defense system that can be explicitly induced depending on the type and sequence of herbivore attack. In addition, molecular adaptation strategies, such as MYB gene expression, and engineering technologies, such as CRISPR/Cas9, have opened up opportunities to improve plant resistance. This study aims to analyze the physiological dynamics of Brassicaceae defense mechanisms, evaluate the role of hormonal and genetic regulation in enhancing plant resistance, and address the critical challenges posed by specialist herbivore adaptations and the socio-environmental implications of genetic engineering. By synthesizing these elements, this article presents a comprehensive review of the potential of these defense systems in advancing sustainable agriculture and promoting human health.

Keywords: Brassicaceae, glucosinolates, herbivory, jasmonates, plant defense, secondary metabolites.

Pendahuluan

Tanaman dari famili *Brassicaceae*, seperti kubis, brokoli, dan sawi, memegang peranan vital dalam ketahanan pangan dan ekonomi global dengan nilai pasar yang terus meningkat (Padilla *et al.*, 2022). Namun, tantangan utama dalam produksinya adalah kerugian hasil yang signifikan akibat serangan hama dan patogen yang semakin adaptif (Zanetti *et al.*, 2022; Jeschke, 2023). Sistem pertahanan utama mereka, yang dikenal sebagai “*mustard oil bomb*”, melibatkan kompartementalisasi glukosinolat dan enzim mirosinase yang menghasilkan senyawa toksik isothiocyanat (Zhang *et al.*, 2006). Meskipun mekanisme dasar ini telah diketahui, dinamika bagaimana sistem ini berinteraksi secara sistemik dengan sinyal lingkungan yang berfluktuasi masih memerlukan pendalaman lebih lanjut.

Respons pertahanan ini diatur oleh jaringan pensinyalan hormonal yang kompleks, di mana asam jasmonat (JA) dan asam salisilat (SA) memainkan peran sentral melalui interaksi antagonis fungsional (Karssemeijer *et al.*, 2020). Jalur JA diaktivasi oleh serangga pengunyah, sementara jalur SA mendominasi pertahanan terhadap patogen biotrofik (Moreira *et al.*, 2018; Papadopoulou *et al.*, 2017). Meskipun regulasi molekuler seperti protein NPR1 telah diidentifikasi, terdapat celah penelitian (*research gap*) mengenai bagaimana *crosstalk* hormonal ini dapat dimanipulasi secara presisi tanpa mengorbankan pertumbuhan tanaman (*growth-defense tradeoff*), sebuah aspek yang seringkali menjadi kendala dalam pemuliaan konvensional.

Penerapan bioteknologi modern, khususnya teknologi CRISPR/Cas9, telah merevolusi modifikasi sifat agronomis tanaman. Melalui manipulasi gen transporter glukosinolat

(GTR1 dan GTR2), peneliti kini mampu mengatur distribusi spasial metabolit pertahanan secara spesifik (Mathur *et al.*, 2023). Artikel ini memiliki kebaruan dengan mengintegrasikan perspektif rekayasa genetika terkini dan regulasi hormonal untuk mengatasi hambatan sistemik dalam pertahanan tanaman. Oleh karena itu, tinjauan ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif mekanisme pertahanan multidimensi pada Brassicaceae dan urgensi integrasi teknologi CRISPR/Cas9 dalam menciptakan varietas yang tangguh sekaligus bernutrisi tinggi bagi keberlanjutan pertanian.

Efisiensi pertahanan yang dihasilkan melalui rekayasa genetika ini tidak hanya berdampak pada ketahanan di lahan, tetapi juga secara langsung memengaruhi kualitas pasca-panen dan nilai fungsional tanaman bagi manusia. Variasi genetik pada profil glukosinolat menawarkan potensi besar untuk mengidentifikasi varietas dengan manfaat nutrasetikal, seperti sifat antikanker dan antioksidan yang lebih stabil (Ahmad, 2018; Blažević *et al.*, 2020). Dengan menyatukan data transkriptomik, metabolomik, dan *gene editing*, pengembangan tanaman Brassicaceae di masa depan diharapkan tidak hanya unggul secara ekologis dalam menghadapi hama, tetapi juga menjadi pilar utama dalam peningkatan kesehatan publik dan keamanan pangan global.

Bahan dan Metode

Studi ini menggunakan metodologi *advance literature review* untuk memahami kemajuan penelitian dan informasi terkait pengetahuan umum Brassica dan Herbivora, mekanisme kerja dari metabolit sekunder tersebut akibat interaksi dengan herbivora, metabolit sekunder brassica yang berpotensi untuk nutrasetikal, riset terkini dalam rekayasa tanaman Brassica untuk tahan serangan herbivora (rekayasa dengan transformasi genetik melibatkan penggunaan berbagai teknik molekular termasuk CRISPR/Cas).

Proses penulisan artikel ini melibatkan pencarian ekstensif publikasi ilmiah di berbagai basis data digital terkemuka seperti ScienceDirect, PubMed, Google Scholar, MDPI, dan ResearchGate, serta database lainnya. Kata kunci yang digunakan relevan dengan topik yang dibahas pada telaah ini seperti "Brassica" "metabolite sekunder" "interaksi dengan herbivora" "nutrasetikal" dan "detoksifikasi xenobiotic" untuk memastikan tinjauan yang

komprehensif dan terstruktur. Penggunaan kata kunci dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris dilakukan untuk mempebesar peluang memperoleh referensi yang diperlukan.

Hasil dan Pembahasan

Tinjauan Umum Famili Brassicaceae dan Interaksinya dengan Serangga Herbivora

Famili Brassicaceae merupakan kelompok tumbuhan berbunga yang memiliki peranan penting secara ekonomi, ekologi, dan ilmiah, terutama sebagai sumber pangan, bahan baku industri, dan model penelitian biologi tanaman (Setiawan *et al.*, 2021). Famili ini mencakup berbagai komoditas bernilai tinggi seperti kubis, sawi, brokoli, dan mustard, yang menunjukkan kemampuan adaptasi luas terhadap beragam kondisi lingkungan (Padilla *et al.*, 2022). Meskipun sebagian besar spesies Brassicaceae berasal dari wilayah beriklim sedang, sejumlah spesies telah beradaptasi dengan baik di wilayah tropis, termasuk Indonesia, dan mampu tumbuh pada kondisi lingkungan yang beragam. Secara morfologi, Brassicaceae dicirikan oleh susunan daun berselang-seling tanpa stipula, bunga bermahkota empat dengan benang sari tetradynamous, serta buah bertipe siliqua atau silicula. Karakter anatomi seperti kutikula tebal dan jaringan pendukung yang berkembang baik berperan dalam perlindungan dan adaptasi terhadap cekaman lingkungan (Majidian *et al.*, 2025). Kombinasi karakter morfologi, anatomi, dan fisiologi tersebut menjadikan Brassicaceae kelompok tanaman yang kompetitif dan potensial dalam sistem pertanian modern.

Keunggulan utama Brassicaceae terletak pada kemampuannya menghasilkan metabolit sekunder bioaktif, terutama glukosinolat, yang berfungsi sebagai mekanisme pertahanan terhadap organisme pengganggu dan memiliki manfaat tambahan bagi manusia (Dereje *et al.*, 2023). Glukosinolat dan produk degradasinya, seperti isothiocyanate, berperan dalam menghambat pertumbuhan patogen, menekan populasi herbivora, serta mendukung aplikasi biofumigasi dan fitoremediasi (Choi *et al.*, 2023). Selain itu, sejumlah spesies Brassicaceae menunjukkan toleransi terhadap cekaman abiotik seperti salinitas dan kekeringan, sehingga berpotensi dikembangkan di lahan marginal (Zanetti *et al.*, 2023). Dari perspektif kesehatan, senyawa seperti sulforafan telah terbukti memiliki aktivitas antikarsinogenik, antioksidan, dan antiinflamasi, yang berkontribusi dalam

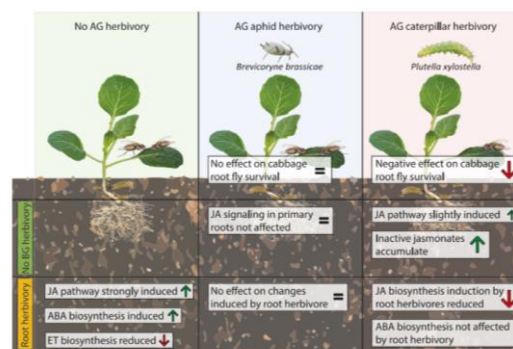
pencegahan penyakit degeneratif (Iqbal *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024). Potensi Brassicaceae juga meluas ke bidang energi berkelanjutan, dengan beberapa spesies dimanfaatkan sebagai sumber bioenergi (Wang *et al.*, 2025). Temuan-temuan ini menunjukkan bahwa Brassicaceae memiliki nilai strategis yang tinggi, baik dalam konteks pertanian berkelanjutan maupun kesehatan manusia.

Konteks ekologi, Brassicaceae menunjukkan interaksi yang kompleks dan dinamis dengan serangga herbivora, di mana respons pertahanan tanaman sangat dipengaruhi oleh jenis, intensitas, dan urutan serangan (Karban, 2020). Penelitian terkini menunjukkan bahwa serangan herbivora awal dapat memodulasi respons tanaman terhadap serangan berikutnya melalui regulasi jalur pensinyalan hormon seperti asam jasmonat, asam salisilat, asam absisat, dan etilen (Zander *et al.*, 2020). Respons ini dapat bersifat sinergis atau antagonistik, tergantung pada identitas herbivora dan jaringan tanaman yang diserang (Mertens *et al.*, 2021a). Beberapa spesies Brassica, urutan serangan herbivora terbukti menentukan tingkat resistensi atau kerentanan terhadap serangan lanjutan, yang mencerminkan adanya mekanisme pertahanan terinduksi dan alokasi sumber daya yang adaptif (Mertens *et al.*, 2021b). Selain itu, respons pertahanan Brassicaceae bersifat sistemik dan melibatkan komunikasi antarjaringan, termasuk antara akar dan pucuk, sehingga satu peristiwa herbivori dapat memengaruhi keseluruhan profil pertahanan tanaman (Valsamakis *et al.*, 2020). Implikasi dari interaksi ini menunjukkan bahwa pemahaman mendalam mengenai pola dan dinamika serangan herbivora sangat penting untuk pengembangan strategi pengelolaan hama berbasis mekanisme pertahanan alami tanaman Brassicaceae.

Mekanisme Aksi Metabolit Sekunder dan Dinamika Glukosinolat dalam Pertahanan Langsung dan Tidak Langsung Brassica terhadap Herbivora

Interaksi antara tanaman *Brassica* dan herbivora melibatkan mekanisme pertahanan yang bersifat langsung dan tidak langsung, serta berlangsung secara lokal maupun sistemik (Hong *et al.*, 2023). Tanaman mengoordinasikan respons pertahanan melalui komunikasi silang antara organ atas tanah dan bawah tanah yang dikendalikan oleh jalur pensinyalan hormon, terutama asam jasmonat (JA) (Poveda *et al.*, 2020). Serangan herbivora pada satu

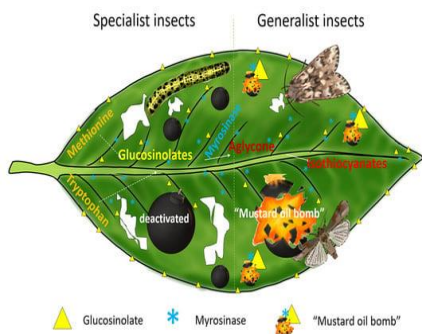
kompartemen tanaman dapat memengaruhi respons pertahanan pada kompartemen lain, bergantung pada jenis herbivora yang menyerang (Sung *et al.*, 2021). Serangan herbivora akar secara tunggal memicu aktivasi pertahanan terlokalisasi di jaringan akar melalui jalur JA dan asam absisat (ABA), sedangkan serangan simultan oleh herbivora penghisap daun tidak selalu menghasilkan sinyal sistemik yang cukup kuat untuk memodulasi respons pertahanan di akar (Coves *et al.*, 2023; Qaderi *et al.*, 2023). Sebaliknya, serangan herbivora pengunyah di atas tanah mampu menginduksi sinyal sistemik yang kuat dan menurunkan kelangsungan hidup herbivora akar melalui modifikasi profil metabolit sekunder secara menyeluruh, menunjukkan pentingnya crosstalk akar-pucuk dalam strategi pertahanan tanaman *Brassica* (Gambar 1).



Gambar 1. Gambaran umum pengaruh kutu daun (*Brevicoryne brassicae*) atau ulat (*Plutella xylostella*) pada tanaman herbivora di atas tanah terhadap akar kelangsungan hidup herbivora (*Delia radicum*) dan sinyal pertahanan akar primer. (Sumber : Karssemeijer *et al.*, 2019)

Salah satu komponen utama pertahanan langsung pada genus *Brassica* adalah sistem glukosinolat-mirosinase yang berperan sebagai pertahanan kimiawi terhadap herbivora (Touw *et al.*, 2020; Bennouna *et al.*, 2021). Tanaman menyimpan glukosinolat dan enzim mirosinase pada kompartemen seluler yang terpisah untuk mencegah auto-toksisitas, namun kerusakan jaringan akibat aktivitas herbivora menyebabkan terjadinya hidrolisis glukosinolat secara cepat dan terkontrol (Kwon *et al.*, 2020; Bell *et al.*, 2023). Reaksi ini menghasilkan senyawa bioaktif, terutama isotiosianat, yang bersifat toksik, volatil, dan antifeedant, sehingga mampu menghambat metabolisme, menurunkan laju pertumbuhan, serta meningkatkan mortalitas herbivora generalis (Vega-Álvarez *et al.*, 2023).

Mekanisme ini dikenal sebagai *mustard oil bomb* dan menjadi dasar efektivitas pertahanan kimiawi *Brassica* terhadap tekanan herbivora (Gambar 2).



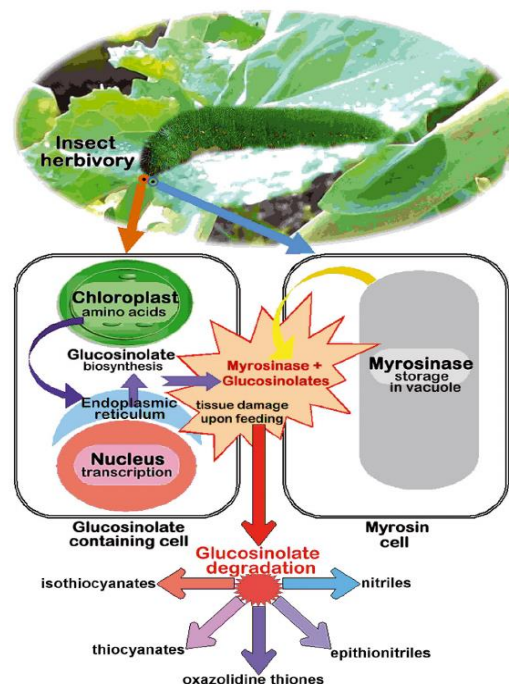
Gambar 2. Representasi skematis mekanisme pertahanan *Brassica* terhadap herbivora, memperlihatkan peran glukosinolat dan mirosinase. Serangan oleh serangga generalis memicu hidrolisis glukosinolat menjadi isotiosianat toksik ("*Mustard oil bomb*"). (Sumber : Chhajer *et al.*, 2020)

Sebaliknya, herbivora spesialis menunjukkan kemampuan adaptif untuk mengatasi atau memodifikasi sistem pertahanan glukosinolat melalui mekanisme fisiologis dan biokimia tertentu, seperti ekspresi *nitrile-specifier protein* dan enzim detoksifikasi yang mengalihkan pembentukan isotiosianat menjadi senyawa yang kurang toksik (Karssemeijer *et al.*, 2020). Beberapa spesies bahkan mampu mensekuestراسi glukosinolat dan memanfaatkannya sebagai alat pertahanan terhadap musuh alamnya sendiri (Yeo *et al.*, 2021). Perbedaan respons antara herbivora generalis dan spesialis ini mencerminkan proses ko-evolusi yang berkelanjutan antara tanaman *Brassica* dan herbivora pemakannya, serta menegaskan bahwa sistem pertahanan kimiawi *Brassica* bersifat selektif, dinamis, dan berperan penting dalam membentuk struktur komunitas herbivora di ekosistem alami (Zhang *et al.*, 2021; Dai *et al.*, 2022).

Biosintesis metabolit sekunder sebagai bentuk pertahanan terhadap serangan herbivora

Dari bebetapa hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman Brassicaceae merespons serangan herbivora melalui aktivasi sistem pertahanan kimiawi yang dimediasi oleh jalur hormon internal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Tanaman meningkatkan biosintesis metabolit sekunder sebagai respons

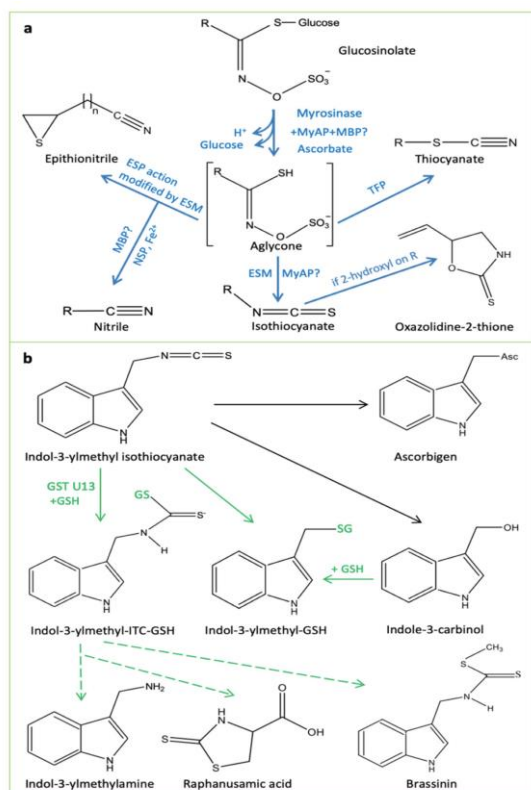
terhadap kerusakan jaringan akibat aktivitas herbivora, dengan respons yang bervariasi tergantung pada lokasi dan jenis serangan. Data visual pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa jalur asam jasmonat (JA) merupakan jalur pertahanan dominan yang teraktivasi, sedangkan jalur hormon lain menunjukkan pola respons yang berbeda. Temuan ini mengindikasikan bahwa pertahanan tanaman bersifat terinduksi dan adaptif terhadap tekanan biotik (Touw *et al.*, 2020, Sarkar *et al.*, 2023).



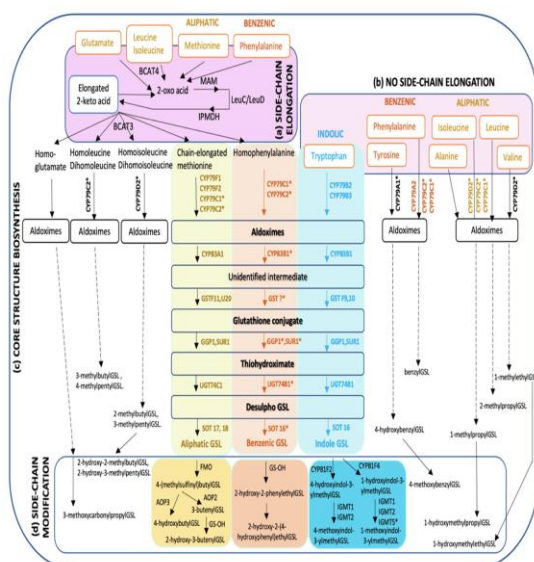
Gambar 3. Mekanisme Aksi Metabolit Sekunder dalam Interaksi *Brassica* dan Serangga Herbivora (Sumber : Ahuja *et al.*, 2011)

Hasil analisis menunjukkan bahwa glukosinolat berperan sebagai metabolit sekunder utama dalam sistem pertahanan Brassicaceae terhadap herbivora, sebagaimana mekanismenya digambarkan pada Gambar 4. Tanaman mensintesis glukosinolat dari asam amino prekursor dan menyimpannya di dalam vakuola, terpisah dari enzim mirosinase. Ketika herbivora menyebabkan kerusakan jaringan, interaksi antara glukosinolat dan mirosinase menghasilkan senyawa hidrolisis reaktif seperti isotiosianat yang bersifat toksik dan antifeedant (Chhajer *et al.*, 2020). Mekanisme ini menyebabkan gangguan fisiologis pada herbivora, termasuk penurunan kemampuan makan dan kelangsungan hidup (Kwon *et al.*, 2020). Hasil ini sejalan dengan teori *mustard oil bomb* yang menyatakan bahwa pemisahan

spasial senyawa dan enzim memungkinkan respons pertahanan yang cepat dan efektif setelah serangan (Vega-Álvarez *et al.*, 2023).



Gambar 4. Struktur glukosinolat dan produk degradasi dari “mustard oil bomb”. (Sumber: Chhajer *et al* 2020)



Gambar 5. Jalur biosintesis glukosinolat alifatik, indol, dan benzenik. (Sumber: Chhajer *et al* 2020)

Regulasi biosintesis glukosinolat dikendalikan secara ketat oleh sinyal stres dan faktor transkripsi yang diaktifkan oleh jalur JA,

sebagaimana dirangkum pada Gambar 5. Tanaman menginduksi faktor transkripsi spesifik, seperti MYB28 dan MYB29 untuk glukosinolat alifatik serta MYB34, MYB51, dan MYB122 untuk glukosinolat indolik, sehingga meningkatkan ekspresi gen biosintetik. Selain itu, peptida sinyal PROSCOOP12 memperkuat respons pertahanan melalui aktivasi reseptor MIK2, yang berkontribusi pada peningkatan akumulasi glukosinolat secara local (Touw *et al.*, 2020). Dibandingkan dengan penelitian lain, hasil ini menegaskan bahwa respons pertahanan tanaman tidak bersifat seragam, melainkan disesuaikan dengan jenis dan lokasi serangan. Implikasi temuan ini menunjukkan bahwa sistem pertahanan kimiawi Brassicaceae bersifat fleksibel dan efisien dalam mengalokasikan sumber daya untuk menghadapi tekanan herbivora yang beragam (Guillou *et al.*, 2022; Sarkar *et al.*, 2023).

Kegunaan Metabolit Sekunder *Brassica* sebagai Nutrasetikal, Riset Terkini, dan Tantangan Pengembangannya

Berdasarkan dari beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman genus *Brassica* memiliki peran strategis sebagai sumber nutrasetikal karena kemampuannya menghasilkan metabolit sekunder bioaktif yang berdampak positif terhadap kesehatan manusia. Glukosinolat beserta produk degradasinya, terutama isotiosianat, merupakan komponen utama yang bertanggung jawab terhadap aktivitas biologis tersebut (Touw *et al.*, 2020). Ketika jaringan *Brassica* mengalami kerusakan selama proses konsumsi, glukosinolat dihidrolisis menjadi isotiosianat seperti sulforafana dan indole-3-carbinol yang menunjukkan aktivitas antikanker, antioksidan, dan antiinflamasi. Secara molekuler, senyawa ini mengaktifasi jalur Nrf2 sehingga meningkatkan ekspresi enzim detoksifikasi fase II dan menekan stres oksidatif seluler (Dai *et al.*, 2022). Selain itu, metabolit lain seperti polifenol dan karotenoid turut berkontribusi dalam menjaga kesehatan kardiovaskular dan metabolik (Qaderi *et al.*, 2023). Temuan ini menegaskan bahwa metabolit sekunder *Brassica* tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme pertahanan tanaman, tetapi juga memiliki implikasi signifikan dalam pencegahan penyakit degeneratif pada manusia (Zanetti *et al.*, 2023).

Seiring dengan meningkatnya pemahaman terhadap manfaat tersebut, riset terkini berfokus pada penguatan biosintesis metabolit sekunder

Brassica melalui pendekatan bioteknologi dan rekayasa molekuler. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa manipulasi faktor transkripsi utama seperti MYB28, MYB29, dan MYB51 mampu meningkatkan akumulasi glukosinolat alifatik dan indolik tanpa menghambat pertumbuhan tanaman (Wang *et al.*, 2021). Selain itu, teknologi penyuntingan genom CRISPR/Cas9 telah berhasil diterapkan pada beberapa spesies *Brassica* untuk memodifikasi gen pertahanan secara presisi dan menghasilkan tanaman bebas transgen (Zhang *et al.*, 2020). Strategi lain seperti RNA interference dan pengaturan transporter glukosinolat juga terbukti efektif dalam meningkatkan ketahanan terhadap herbivora utama (Neequaye *et al.*, 2021). Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi biologi molekuler dan fisiologi tanaman berpotensi menghasilkan varietas *Brassica* yang memiliki ketahanan biotik tinggi sekaligus kandungan nutrasetikal yang lebih optimal (Qin *et al.*, 2023; Cai *et al.*, 2024; Ceasar *et al.*, 2024).

Meskipun demikian, tantangan ke depan dalam pengembangan metabolit sekunder *Brassica* terletak pada kompleksitas interaksi antara tanaman, herbivora, dan lingkungan. Beberapa herbivora telah menunjukkan kemampuan adaptasi fisiologis terhadap sistem glukosinolat–mirosinase, sehingga efektivitas pertahanan tanaman dapat menurun seiring waktu (Karban, 2020). Selain itu, peningkatan kandungan metabolit sekunder tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan ketahanan atau manfaat kesehatan karena adanya trade-off dengan pertumbuhan, hasil panen, dan interaksi ekologi (Chhikara *et al.*, 2022). Kompleksitas genom poliploid pada beberapa spesies *Brassica* juga menyulitkan pemetaan gen dan penerapan penyuntingan genom presisi (Zhang *et al.*, 2022). Faktor lingkungan dan perubahan iklim turut memengaruhi profil metabolit sekunder serta efektivitas biologisnya (Rathore *et al.*, 2023). Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengintegrasikan pendekatan multi-omik, sistem pertahanan induktif, serta strategi pertanian berkelanjutan agar pemanfaatan metabolit sekunder *Brassica* sebagai nutrasetikal dan sumber ketahanan tanaman dapat dioptimalkan secara adaptif dan berkelanjutan.

Kesimpulan

Tanaman Brassicaceae telah mengembangkan sistem pertahanan kimia yang

sangat efisien melalui produksi dan aktivasi metabolit sekunder seperti glukosinolat, yang memberikan perlindungan langsung dan tidak langsung terhadap berbagai jenis herbivora. Aktivasi jalur pertahanan ini melibatkan sinyal hormonal seperti JA, SA, dan ET, serta memperlihatkan dinamika sistemik antara organ atas dan bawah tanah. Respons ini bersifat spesifik tergantung pada tipe herbivora, memungkinkan tanaman untuk mengalokasikan sumber daya secara efisien. Keberadaan “mustard oil bomb” sebagai mekanisme pertahanan utama menunjukkan strategi evolusioner yang unik terhadap tekanan biotik. Teknologi molekuler modern seperti CRISPR/Cas9 dan RNAi menawarkan pendekatan baru dalam memperkuat pertahanan tanaman, meskipun tantangan adaptasi herbivora, kompleksitas genomik, dan resistensi publik terhadap tanaman transgenik tetap perlu diatasi. Integrasi pendekatan genetika, ekofisiologi, dan bioteknologi menjadi kunci untuk menghasilkan varietas *Brassica* yang tahan hama dan ramah lingkungan, sekaligus memperkuat nilai fungsional tanaman ini sebagai sumber nutrisi dan nutrasetikal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ketua Program Studi Magister Biologi, Departemen Biologi, FMIPA Universitas Andalas atas fasilitas yang diberikan selama penulisan artikel ini.

Referensi

- Ahmad Jan, S. (2018). Antioxidant and anticancer activities of *Brassica rapa*: a review. *MOJ Biology and Medicine*, 3(4), 3–7.
<https://doi.org/10.15406/mojbm.2018.03.00094>
- Ahuja, I., Rohloff, J., & Bones, A. M. (2011). Defence mechanisms of Brassicaceae: implications for plant-insect interactions and potential for integrated pest management. *Sustainable Agriculture Volume 2*, 623-670.
- Bell, L., Oruna-Concha, M. J., & De Haro-Bailon, A. (2023). Editorial: Nutritional quality and nutraceutical properties of Brassicaceae (Cruciferae). *Frontiers in*

- Nutrition*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1292964>
- Bennouna, D., Tourniaire, F., Durand, T., Galano, J. M., Fine, F., Fraser, K., Benatia, S., Rosique, C., Pau, C., Couturier, C., Pontet, C., Vigor, C., Landrier, J. F., & Martin, J. C. (2021). The Brassica napus (oilseed rape) seeds bioactive health effects are modulated by agronomical traits as assessed by a multi-scale omics approach in the metabolically impaired ob-mouse. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 2(January), 100011. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100011>
- Cai, L., Zhang, R., & Wang, Y. (2024). Targeted manipulation of GSL transporters to reduce seed GSL while enhancing foliar defense. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1256. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.01256>
- Ceasar, S. A., Maharajan, T., & Ignacimuthu, S. (2024). Efficient genome editing in polyploid Brassica juncea using CRISPR/Cas9. *BMC Plant Biology*, 24(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04567-0>
- Chhajed, S., Mostafa, I., He, Y., Abou-Hashem, M., El-Domiaty, M., & Chen, S. (2020). Glucosinolate biosynthesis and the glucosinolate–myrosinase system in plant defense. *Agronomy*, 10(11), 1786. [10.3390/agronomy10111786](https://doi.org/10.3390/agronomy10111786)
- Chhikara, S., Kaur, R., & Singh, P. (2022). *Challenges and prospects of genome editing in Brassica species*. Critical Reviews in Biotechnology, 42(1), 58–76. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1944846>
- Choi, Y. J., Lee, D. H., & Kim, H. J. (2023). Protective effects of sulforaphane on inflammation and oxidative stress: A clinical perspective. *Antioxidants*, 13(2), 147. <https://doi.org/10.3390/antiox13020147>
- Coves, S., Soengas, P., Velasco, P., Fernández, J. C., & Cartea, M. E. (2023). New vegetable varieties of Brassica rapa and Brassica napus with modified glucosinolate content obtained by mass selection approach. *Frontiers in Nutrition*, 10(July). <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1198121>
- Dai, Y., Zhang, L., Sun, X., Li, F., Zhang, S., Zhang, H., Li, G., Fang, Z., Sun, R., Hou, X., & Zhang, S. (2022). Transcriptome analysis reveals anthocyanin regulation in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.) at low temperatures. *Scientific Reports*, 12(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10106-1>
- Dereje, B., Jacquier, J.-C., Elliott-Kingston, C., Harty, M., & Harbourne, N. (2023). Brassicaceae microgreens: Phytochemical compositions, influences of growing practices, postharvest technology, health, and food applications. *ACS Food Science & Technology*, 3(5), 981–998.
- Guillou, M. C., Bernonville, T. D., Jorly, J., *et al.* (2022). PROSCOOP12–MIK2 signaling regulates root defense responses in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 852808. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.852808>
- Iqbal, M., Khan, M. A., & Ahmad, A. (2024). Glucosinolate-derived isothiocyanates: Potential biofumigants from Brassicaceae for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 15, 12029985. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.12029985>
- Jeschke, V., Gershenzon, J., & Vassão, D. G. (2023). *Insect detoxification of glucosinolates and their hydrolysis products*. Biochimie, 130, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2016.06.003>
- Karban, R. (2020). *Plant communication and induced resistance against herbivores*. Functional Ecology, 34(1), 3–6. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13429>
- Karssemeijer, P. N., Reichelt, M., Gershenzon, J., van Loon, J., & Dicke, M. (2020). Foliar herbivory by caterpillars and aphids differentially affects phytohormonal signalling in roots and plant defence to a root herbivore. *Plant Cell and Environment*, 43(3), 775–786. <https://doi.org/10.1111/pce.13707>
- Kwon, H. Y., Choi, S. Il, Park, H. I., Choi, S. H., Sim, W. S., Yeo, J. H., Cho, J. H., & Lee, O. H. (2020). Comparative Analysis of the Nutritional Components and Antioxidant Activities of Different Brassica juncea Cultivars. *Foods*, 9(6), 4–13. <https://doi.org/10.3390/foods9060840>
- Majidian, M., Hassan, M., & Walia, S. (2025). Habitat suitability modeling of dominant weed in canola (*Brassica napus*) fields using machine learning techniques. *Weed Science*, 73(1), 45–56.

- <https://doi.org/10.1017/wsc.2025.5> Cambridge University Press & Assessment
- Mathur, V., Tytgat, T.O.G., de Graaf, R.M., Kalia, V., Sankara, R. A, Vet LEM, van Dam NM. (2023). Dealing with double trouble: consequences of single and double herbivory in Brassica juncea. *Chemoecology* 23(2):71–82. <https://doi.org/10.1007/s00049-012-0120-z>
- Mertens D, Boege K, Kessler A, Thaler JS, Whiteman NK, Poelman EH (2021a) Predictability of biotic stress structures plant defence evolution. *Trends Ecol Evol* 36(5):444–456. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.12.009>
- Mertens D, Fernández de Bobadilla M, Rusman Q, Bloem J, Doum JC, Poelman EH (2021b) Plant defence to sequential attack is adapted to prevalent herbivores. *Nat Plants*. <https://doi.org/10.10138/s41477-021-00999-7>
- Moreira, X., Abdala-Roberts, L., Castagneyrol, B. (2018). Interactions between plant defence signalling pathways: evidence from bioassays with insect herbivores and plant pathogens. *J Ecol* 106(6):2353–2364. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12987>
- Neequaye, M., *et al.* (2021). MYB28 gene knockout impacts root herbivore resistance in Brassica oleracea. *New Phytologist*, 229(4), 2157–2170. <https://doi.org/10.1111/nph.16996>
- Padilla, C., Gómez-Merino, F. C., & Martínez, T. (2022). Morphological and anatomical adaptations of Brassicaceae under abiotic stress conditions. *Plant Biology International*, 4(1), 34–47.
- Papadopoulou, G. V., & van Dam, N. M. (2017). Mechanisms and ecological implications of plant-mediated interactions between belowground and aboveground insect herbivores. *Ecological Research*, 32(1), 13–26. <https://doi.org/10.1007/s11284-016-1411-5>
- Poveda, J., Francisco, M., Cartea, M. E., & Velasco, P. (2020). Development of transgenic brassica crops against biotic stresses caused by pathogens and arthropod pests. *Plants*, 9(12), 1–23. <https://doi.org/10.3390/plants9121664>
- Qaderi, M. M., Martel, A. B., & Strugnelli, C. A. (2023). Environmental Factors Regulate Plant Secondary Metabolites. *Plants*, 12(3), 1–27. <https://doi.org/10.3390/plants12030447>
- Qin, J., Li, Y., & Xu, B. (2023). Overexpression of MYB51 boosts glucosinolate content and pest resistance. *Plant Science Journal*, 317, 111271. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111271>
- Rathore, A., Singh, N., & Sharma, R. (2023). Integration of omics tools in brassica defense: A systems biology perspective. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1172334. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1172334>
- Sarkar, A., Kisiala, A., Adhikary, D., Basu, U., Emery, R. J. N., Rahman, H., & Kav, N. N. V. (2023). Silicon ameliorates clubroot responses in canola (Brassica napus): A “multi-omics”-based investigation into possible mechanisms. *Physiologia Plantarum*, 175(2), 1–22. <https://doi.org/10.1111/ppl.13900>
- Sung, J., Baek, S., Kim, J., X. Kim, Y., Lee, Y., Lee, S., Lee, D., & Jung, H. (2021). Responses of Primary Metabolites and Glucosinolates in Sulfur Deficient-Cabbage (Brassica rapa L. ssp. Pekinensis). *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2329-9029.1000223>
- Touw, A. J. A., Berg, J. V. D., *et al.* (2020). Both biosynthesis and transport contribute to the accumulation of defensive glucosinolates in roots of Brassica rapa. *New Phytologist*, 225(1), 432–446. <https://doi.org/10.1111/nph.16115>
- Touw, A. J., Verdecia Mogena, A., Maedicke, A., Sontowski, R., van Dam, N. M., & Tsunoda, T. (2022). Both Biosynthesis and Transport Are Involved in Glucosinolate Accumulation During Root-Herbivory in Brassica rapa. *Frontiers in Plant Science*, 10(January), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01653>
- Valsamakis, G., Bittner, N., Fatouros, N. E., Kunze, R., Hilker, M., & Lortzing, V. (2020). Priming by timing: Arabidopsis thaliana adjusts its priming response to lepidoptera eggs to the time of larval hatching. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1969. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01969>
- Vega-Álvarez, C., Francisco, M., Cartea, M. E., Fernández, J. C., & Soengas, P. (2023). The growth-immunity tradeoff in Brassica

- oleracea-Xanthomonas campestris pv. campestris pathosystem. *Plant Cell and Environment*, 46(10), 2985–2997.<https://doi.org/10.1111/pce.14454>
- Wang, J., Li, Y., & Zhang, X. (2025). Comparative tolerance of *Brassica juncea* and *Brassica napus* to salt stress and the role of glucosinolates. *Plant Stress*, 6, 100099.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100099>
- Wang, L., & Chen, X. (2021). Transgenic expression of lectins improves aphid resistance in Brassica. *Molecular Breeding*, 41(5), 55.
<https://doi.org/10.1007/s11032-021-01241-7>
- Wang, Y., Xu, L., & Huang, Z. (2024). Sulforaphane modulates oxidative biomarkers and inflammation in healthy adults: A randomized clinical trial. *Phytotherapy Research*, 38(1), 188–197.
<https://doi.org/10.1002/ptr.8123>
- War AR, Paulraj MG, Ahmad T, Buhroo AA, Hussain B, Ignacimuthu S, Sharma HC (2012) Mechanisms of plant defense against insect herbivores. *Plant Signal Behav* 7(10):1306–1320.
<https://doi.org/10.4161/psb.21663>
- Yeo, H. J., Baek, S. A., Sathasivam, R., Kim, J. K., & Park, S. U. (2021). Metabolomic analysis reveals the interaction of primary and secondary metabolism in white, pale green, and green pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*). *Applied Biological Chemistry*, 64(1).
<https://doi.org/10.1186/s13765-020-00574-2>
- Zander, M., Lewsey, M. G., Clark, N. M., Yin, L., Bartlett, A., Saldierna Guzmán, J. P., Hann, E., Langford, A. E., Jow, B., & Wise, A., *et al.* (2020). Integrated multi-omics framework of the plant response to jasmonic acid. *Nature Plants*, 6, 290–302.
<https://doi.org/10.1038/s41477-020-0612-6>
- Zanetti, F., Monti, A., & Berti, M. (2023). Agronomic performance of *Brassica napus* for biodiesel production under Mediterranean conditions. *Energies*, 17(23), 6177.
<https://doi.org/10.3390/en17236177>
- Zhang, F., Wang, Y., & Zhang, J. (2020). Host-induced gene silencing of COPB2 reduces pest survival in Brassica. *Plants*, 9(12), 1664.
<https://doi.org/10.3390/plants9121664>
- Zhang, K., Mason, A. S., Farooq, M. A., Islam, F., Quezada-Martinez, D., Hu, D., Yang, S., Zou, J., & Zhou, W. (2021). Challenges and prospects for a potential allohexaploid Brassica crop. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(9), 2711–2726.
<https://doi.org/10.1007/s00122-021-03845-8>
- Zhang, T., Liu, Y., & Xu, B. (2022). Metabolomic profiling of Brassica under herbivore stress reveals dynamic defense responses. *BMC Plant Biology*, 22, 423.
<https://doi.org/10.1186/s12870-022-03748-3>