

SENYAWA BIOMARKER DAN DINAMIKA METABOLOMIK SEBAGAI MEKANISME PERTAHANAN TANAMAN TERHADAP SERANGAN PATOGEN

Disusun Oleh :

Dr. Muhammad Alam Firmansyah, S.Hut., M.Si



**SILVIKULTUR
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR**

SENYAWA BIOMARKER DAN DINAMIKA METABOLOMIK SEBAGAI MEKANISME PERTAHANAN TANAMAN TERHADAP SERANGAN PATOGEN

Oleh: Muhammad Alam Firmansyah

ABSTRAK

Sebagai organisme sesil, tanaman tidak dapat menghindari ancaman patogen secara fisik. Sebagai gantinya, tanaman mengandalkan dinamika metabolisme yang sangat kompleks untuk bertahan hidup. Makalah ini mengkaji peran senyawa biomarker sebagai indikator biologis dari respon pertahanan tanaman terhadap serangan patogen, khususnya melalui pendekatan metabolomik. Studi kasus pada interaksi antara tomat liar (*Solanum cheesmaniae*) dan cendawan patogen *Alternaria solani* menunjukkan bahwa infeksi patogen memicu pergeseran masif dari metabolisme primer ke metabolisme sekunder. Identifikasi biomarker melalui *Liquid Chromatography-Mass Spectrometry* (LC-MS) tidak hanya mengungkap senyawa pertahanan seperti fenol dan indol, tetapi juga membuka peluang besar dalam pemuliaan tanaman varietas unggul, pengembangan agen pengendali hayati, serta peningkatan ketahanan tanaman kehutanan dan pertanian terhadap perubahan iklim.

Kata Kunci: Biomarker, Metabolomik, Patogen Tanaman, Metabolit Sekunder, Interaksi Tanaman-Mikroba.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam menjalankan fungsi fisiologisnya, tanaman secara konstan berinteraksi dengan lingkungan, baik faktor abiotik maupun biotik. Metabolit primer yang dihasilkan tanaman berfungsi sebagai fondasi energi untuk pertumbuhan dan perkembangan dasar. Namun, ketika tanaman menghadapi tekanan lingkungan—seperti suhu ekstrem, kekeringan, atau serangan patogen—fungsi fisiologi ini akan terganggu. Sebagai respons evolusioner, tanaman memicu jalur metabolisme khusus (sekunder) untuk menghasilkan senyawa-senyawa pertahanan (Dixon, 2001).

Senyawa yang diproduksi sebagai respons biologis terhadap tekanan ini dikenal sebagai biomarker. Biomarker berfungsi sebagai indikasi molekuler awal adanya gangguan pada tanaman. Dalam beberapa tahun terakhir, metabolomik telah berkembang menjadi alat yang sangat powerful untuk memetakan ribuan molekul kecil (metabolit) secara simultan, sehingga memberikan gambaran utuh mengenai "status kesehatan" dan strategi pertahanan tanaman pada tingkat biokimia (Castro-Moretti *et al.*, 2020; Erban & Kopka, 2019).

Pemahaman terhadap biomarker ini memiliki implikasi yang sangat luas. Di bidang pertanian dan kehutanan, biomarker dapat dieksploitasi untuk pemuliaan varietas komersial yang resisten, atau untuk mengisolasi senyawa aktif yang dapat diformulasikan menjadi agen pengendali hayati (biopestisida). Oleh karena itu, makalah ini bertujuan untuk membedah respons metabolik tanaman terhadap serangan patogen melalui pendekatan metabolomik, serta mengimplikasikan temuan tersebut dalam konteks manajemen kesehatan tanaman secara berkelanjutan.

1.2. Tujuan

Makalah ini disusun untuk menganalisis respons metabolik tanaman terhadap serangan patogen, mengidentifikasi senyawa biomarker kunci yang berperan dalam mekanisme pertahanan, serta mengevaluasi potensi aplikasinya dalam pemuliaan tanaman dan pengendalian hayati berbasis mikrobiologi dan kehutanan.

II. LANDASAN TEORI: METABOLISME DAN SISTEM IMUN TANAMAN

Tanaman mampu mensintesis ribuan jenis metabolit unik. Senyawa-senyawa ini tidak hanya berfungsi untuk menarik polinator, tetapi juga sebagai "gudang senjata kimia" untuk menangkal herbivora, menghambat patogen, dan beradaptasi terhadap cekaman abiotik (Jones & Dangl, 2006).

Sistem imun tanaman secara umum terbagi menjadi dua lapisan utama: Pattern-Triggered Immunity (PTI) dan Effector-Triggered Immunity (ETI). Ketika patogen berhasil menembus pertahanan fisik, tanaman akan mendeteksi molekul mikroba (PAMPs/MAMPs) dan memicu produksi metabolit sekunder seperti fitoaleksin, spesies oksigen reaktif (ROS), dan protein terkait patogenesis (PR) (Glazebrook, 2005). Proses ini sangat dinamis dan membutuhkan realokasi energi yang besar dari metabolisme primer (pertumbuhan) ke metabolisme sekunder (pertahanan), sebuah fenomena yang dikenal sebagai trade-off antara pertumbuhan dan imunitas (Pieterse et al., 2014).

III. STUDI KASUS: METABOLOMIK PADA INTERAKSI *Solanum cheesmaniae* DAN *Alternaria solani*

3.1. Pemilihan Model Tanaman dan Patogen

Solanum cheesmaniae merupakan spesies tomat liar yang tumbuh di habitat ekstrem. Spesies liar umumnya memiliki variasi genetik yang sangat tinggi, yang berimplikasi pada ketahanan biologis yang lebih kuat dibandingkan spesies komersial. Karena itu, *S. cheesmaniae* sering dijadikan sumber genetik untuk pemuliaan tomat modern.

Di sisi lain, *Alternaria solani* merupakan cendawan patogen penyebab penyakit bercak daun (hawa daun), yang bertanggung jawab atas lebih dari 50% kerusakan pada tanaman tomat secara global. Cendawan ini menyerang seluruh jaringan tanaman, namun gejala visual paling dominan muncul pada daun.

3.2. Metodologi Penelitian

Benih *S. cheesmaniae* disemaikan pada media campuran tanah, cocopeat, perlite, dan vermiculite (rasio 3:1:1:1). Setelah berumur 60 hari, tanaman diinokulasi dengan suspensi spora *A. solani*. Pengamatan dan pengambilan sampel dilakukan pada hari ke-5 pasca-inokulasi, yaitu pada fase kritis awal infeksi. Sampel diekstraksi menggunakan pelarut etil asetat serta campuran metanol dan air.

Analisis profil metabolit dilakukan menggunakan instrumen *Liquid Chromatography-Mass Spectrometry* (LC-MS). Data mentah diproses menggunakan software Compound Discover 3.3, dan analisis varians (ANOVA) diterapkan untuk memfilter senyawa-senyawa yang memiliki signifikansi statistik sebagai biomarker.

3.3. Hasil Identifikasi Metabolomik

Selama 5 hari pasca-inokulasi, insidensi penyakit pada *S. cheesmaniae* tercatat sebesar 17%, menunjukkan tingkat ketahanan yang cukup baik. Analisis LC-MS mendeteksi 5.911 metabolit pada tanaman sehat (kontrol), yang melonjak menjadi 9.451 metabolit pada tanaman yang terinfeksi.

Berdasarkan basis data KEGG, sebanyak 3.371 senyawa berhasil diidentifikasi. Terjadi perubahan drastis pada jalur metabolisme: 541 senyawa mengalami peningkatan (upregulated) dan 485 senyawa mengalami penurunan (downregulated). Secara spesifik, terdapat 34 senyawa biomarker kunci yang meningkat dan 41 senyawa biomarker yang menurun sebagai respons langsung terhadap infeksi.

IV. PEMBAHASAN: DINAMIKA SENYAWA BIOMARKER DAN IMPLIKASINYA

4.1. Pergeseran Metabolik dan Senyawa Pertahanan

Peningkatan senyawa biomarker pada *S. cheesmaniae* didominasi oleh metabolit konjugasi asam lemak, aldehida, turunan piridin, triptamin, indol, fenol, kalkon, vitamin (K dan E), serta brasinosteroid.

Dari perspektif biokimia dan mikrobiologi, senyawa-senyawa ini memiliki peran yang sangat spesifik:

Fenol dan Indol: Bertindak sebagai fitoaleksin (senyawa antimikroba langsung) dan antioksidan kuat. Saat patogen menyerang, tanaman akan menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang dapat merusak sel tanaman itu sendiri jika tidak dikontrol. Senyawa fenolik dan indol berfungsi menetralkan ROS sekaligus meracuni hifa cendawan *A. solani* (Wasternack & Song, 2017).

Brasinosteroid dan Asam Lemak: Berperan sebagai molekul pensinyalan (hormon) yang mengatur ekspresi gen pertahanan dan memicu *Systemic Acquired Resistance* (SAR), sehingga bagian tanaman yang belum terinfeksi ikut "siaga" (Conrath et al., 2015).

Sebaliknya, penurunan (downregulated) 41 senyawa biomarker lainnya mencerminkan strategi bertahan hidup tanaman. Tanaman secara sadar "mematikan" sementara jalur metabolisme yang tidak esensial untuk bertahan hidup, memusatkan seluruh energi untuk sintesis senyawa pertahanan (Jones & Dangl, 2006).

4.2. Perspektif Mikrobiologi dan Kehutanan: Peran Agen Hayati

Pemahaman terhadap biomarker metabolik ini sangat relevan dengan perkembangan teknologi hayati di bidang kehutanan dan pertanian, khususnya dalam pemanfaatan mikroba endofit seperti *Dark Septate Endophyte* (DSE) atau mikoriza.

Dalam ekosistem hutan yang kompleks, tanaman tidak berdiri sendiri; mereka bersimbiosis dengan ribuan mikroba di area perakaran (rizosfer) dan jaringan internal (endofit). Mikroba menguntungkan seperti DSE diketahui mampu memodifikasi jalur metabolit sekunder inang. Ketika tanaman berkolonisasi dengan DSE, mikroba tersebut secara tidak langsung "memicu" (melakukan priming) jalur biosintesis biomarker pertahanan—seperti fenol dan indol—sehingga ketika patogen hutan menyerang, tanaman sudah berada dalam keadaan siaga dan mampu menghambat infeksi lebih cepat (Pieterse et al., 2014).

Selain itu, aplikasi DSE pada lahan terdegradasi ($\text{pH} < 4$) terbukti mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman pinus dan tanaman kehutanan lainnya. DSE tidak hanya membantu penyerapan nutrisi, tetapi juga melokalisasi logam berat dan memproduksi metabolit yang secara langsung menghambat patogen, sejalan dengan temuan biomarker pada studi metabolomik di atas. Ini membuktikan bahwa intervensi mikrobiologi adalah kunci untuk mengaktifkan "pabrik biomarker" alami pada tanaman.

4.3. Tantangan dan Peluang di Masa Depan

Meskipun metabolomik menawarkan gambaran yang komprehensif, tantangan terbesar saat ini adalah kompleksitas dan variasi senyawa metabolit yang sangat tinggi, di mana banyak senyawa turunan yang belum terpetakan dalam basis data publik. Ke depan, integrasi antara metabolomik, genomik, dan mikrobioma (multi-omics) akan menjadi standar emas dalam memetakan mekanisme pertahanan tanaman secara utuh.

V. KESIMPULAN

Serangan patogen memicu dinamika metabolisme yang masif pada tanaman, ditandai dengan pergeseran dari metabolisme primer ke sekunder. Senyawa biomarker yang meningkat, seperti fenol, indol, dan brassinosteroid, berperan krusial dalam menetralkan patogen, mengurangi stres oksidatif, dan mengaktifkan sistem imun tanaman. Identifikasi biomarker melalui pendekatan metabolomik LC-MS pada *Solanum cheesmaniae* yang diinfeksi *Alternaria solani* membuktikan bahwa tanaman liar memiliki "gudang senjata" kimia yang sangat potensial.

Pengetahuan ini tidak hanya berharga untuk pemuliaan varietas tanaman komersial yang resisten, tetapi juga menjadi landasan ilmiah bagi pemanfaatan agen pengendali hayati berbasis mikroba (seperti cendawan endofit DSE) untuk menginduksi ketahanan sistemik pada tanaman pertanian maupun kehutanan.

DAFTAR PUSTAKA

- Balmer, D., Pastor, V., Gamir, J., Flors, V., & Mauch-Mani, B. (2015). The 'primed' plant: a new concept in plant immunity. *Trends in Plant Science*, 20(1), 27-35.
- Castro-Moretti, F. R., Gentzel, I. N., Mackey, D., & Alonso, A. P. (2020). Metabolomics as an emerging tool for the study of plant-pathogen interactions. *Metabolites*, 10(2), 52.
- Conrath, U., Beckers, G. J., Langenbach, C. J., & Jaskiewicz, M. R. (2015). Priming in systemic plant immunity. *Science*, 348(6230), 80-81.
- Dixon, R. A. (2001). Natural products and plant disease resistance. *Nature*, 411(6840), 843-847.
- Erban, A., & Kopka, J. (2019). Metabolomics in plant pathology. *Current Opinion in Plant Biology*, 50, 113-120.
- Glazebrook, J. (2005). Contrasting mechanisms of defense against biotrophic and necrotrophic pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 43, 205-227.
- Jones, J. D., & Dangl, J. L. (2006). The plant immune system. *Nature*, 444(7117), 323-329.

Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance and the trades off between immunity and growth. *Current Opinion in Plant Biology*, 20, 115-122.

Singh, D. P., Bisen, M. S., Prabha, R., Maurya, S., Samir, S. R. Y., Shukla, R., Tiwari, J. K., Chaturvedi, K. K., Mohan, F. P., Srivastava, S., Rai, A., Sarma, B. K., Rai, N., Singh, Behera, T. K., & Farag, M. A. (2023). Untargeted metabolomics of *Alternaria solani* challenged wild tomato species *Solanum cheesmaniae* revealed key metabolite biomarkers and insight into altered metabolic pathways. *Metabolites*, 13(5), 585.

Wasternack, C., & Song, S. (2017). Jasmonates: biosynthesis, perception, and signaling. *The Plant Cell*, 29(4), 611-629.