
A REVIEW: PERAN EKSPRESI GEN PR-1 (*PATHOGENESIS RELATED PROTEINS-1*) DALAM RESISTENSI TANAMAN DAN IMPLIKASINYA PADA BIOTEKNOLOGI PERTANIAN

Nia Febrianti¹, Dian Dwi Lestari², Yusminah Hala³

^{1,2,3} Program Studi Pendidikan Biologi, Pascasarjana Universitas Negeri Makassar, Makassar,
Sulawesi Selatan, Indonesia

Article History

Received: March 20, 2025

Revised: May 25, 2025

Accepted: May 27, 2025

Correspondence

Nia Febrianti

e-mail: nia.febrianti45@gmail.com

ABSTRACT

The *pr-1* gene is a gene that encodes the *PR-1* (Pathogenesis-Related 1) protein which plays a role in the plant defense response to pathogen infection. Although the role of the *pr-1* gene as a defense protein has been known, the specific mechanism of how *pr-1* responds to various types of pathogens in various plants is still poorly studied in various studies. Therefore, an in-depth analysis is needed regarding the role of the *pr-1* gene in plant resistance. This study aims to determine the role of *pr-1* (Pathogenesis Associated Proteins-1) gene expression on plant resistance and its implications for agricultural biotechnology. The research method used is a literature study with a qualitative approach. The results of the literature findings were then analyzed descriptively to determine the role of the *pr-1* gene in the plant defense response. The findings show that the main role of the *pr-1* gene is as a plant defense system against biotic and abiotic environmental threats. The plant resistance mechanism carried out by the *PR-1* Protein will be active if there is PAMP/MAMP detection received by the plant cell surface receptor PRR (Pattern Recognition Receptors) to carry out the function of gene expression in plant organs.

Keywords: Agricultural Biotechnology, Plant Resistance, PR-1

PENDAHULUAN

Tanaman sebagai salah satu komponen biotik dari ekosistem seringkali menghadapi tantangan selama proses pertumbuhan dan perkembangannya, salah satunya adalah tekanan dari lingkungan. Tekanan yang diterima tanaman dibagi dalam dua kategori yaitu stres biotik dan stres abiotik. Stres abiotik meliputi berbagai kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan seperti kekeringan, salinitas, sinar UV dan stres osmotik, sedangkan stres biotik adalah tekanan yang disebabkan karena adanya gangguan organisme hidup yang menular, seperti virus, jamur, bakteri atau nematoda. Kedua jenis stres ini dapat menimbulkan dampak negatif bagi produktivitas dan keberlangsungan hidup tanaman (Gall *et al.*, 2015). Tekanan ini tentunya akan merugikan pematangan bagi tanaman karena menyebabkan banyak gangguan metabolisme yang dapat menjadi penyebab utama kematian sel. Akan tetapi, tanaman berupaya merespons tekanan lingkungan tersebut dengan mengembangkan berbagai mekanisme akumulasi

fitohormon seperti asam absisat (ABA), asam salisilat (SA), asam jasmonat (JA), etilen (ET) dan berbagai gen pertahanan. Protein-protein ini mengendalikan akumulasi protein kecil yang dikenal sebagai protein terkait patogen (Protein PR) yang dapat menghambat perkembangbiakan bagi tanaman yang terinfeksi patogen (Zribi *et al.*, 2023).

Salah satu cara untuk dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen yaitu dengan menginduksi resistensi sistemik yang dipicu oleh adanya gen promotor tertentu (gen resistensi yang didapat secara sistemik/SAR). Resistensi tanaman merupakan sebuah sistem yang terdiri dari makromolekul kompleks yang berperan dalam menjaga pertahanan tubuh tanaman. Kekebalan tanaman melibatkan beberapa lapisan respons pertahanan yang akan diaktifkan apabila ada deteksi PAMP (*Pathogen-Associated Molecular Pattern*), MAMP (*Microbe-Associated Molecular Pattern*) dan stres lingkungan yang dikenali sebagai benda asing oleh reseptor pengenalan tanaman (Kattupalli *et al.*, 2021). Salah satu sifat utama dari SAR adalah adanya akumulasi protein *pr* yang sangat cepat pada tanaman yang terinduksi dibandingkan dengan reaksi kompatibel (Figueroa *et al.*, 2018). Tanaman seperti tembakau dan Arabidopsis dapat menghasilkan SAR yang berkaitan erat dengan ekspresi protein *pr* (Zhang & Li, 2019). Deteksi patogen yang dianggap sebagai benda asing ini akan memicu tanaman untuk mengaktifkan sistem kekebalan tubuhnya.

Terjadinya peningkatan resistensi tanaman terhadap cekaman biotik dimulai melalui induksi gen *pr* terhadap serangan patogen. Respons dari adanya serangan ini diawali dengan pengenalan patogen oleh tumbuhan, yang selanjutnya akan memberikan sinyal-sinyal ke seluruh bagian tanaman untuk dapat melepaskan enzim-enzim yang bertindak sebagai perlawanan bagi patogen. Kemudian sel-sel tumbuhan akan mengeluarkan protein *pr-1* sebagai proteksi terhadap munculnya patogen. Gen-gen ini akan berkomunikasi antara patogen dengan jaringan sel tanaman untuk menghambat terjadinya penyebaran serangan patogen ke dalam dinding sel tanaman (Chandrashekar *et al.*, 2018). PR-1 merupakan salah satu kelompok protein yang diproduksi paling banyak selama respons pertahanan tanaman dan ada di mana-mana di semua spesies tanaman.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa PR-1 dapat ditemukan pada berbagai bagian tanaman yang umumnya berpartisipasi dalam respons stres dan proses biologis penting lainnya (Almeida & Venancio, 2022). Kajian terkait gen *pr-1* telah banyak dilakukan seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Fang *et al* (2019) menunjukkan bahwa adanya peningkatan resistensi melalui ekspresi MuPR1 terhadap *Botrytis cinerea* dan Pst. DC300 dipicu oleh hormon tanaman seperti asam salisilat, asam jasmonat dan giberelin 3. Selain itu, peptida yang berasal dari protein C-terminus MuPr1 berperan dalam mengaktifkan ketahanan terhadap tanaman sehingga penggunaan hormon pertumbuhan ini sangat menentukan kesuksesan berjalannya mekanisme pertahanan tanaman. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Ali *et al* (2018) juga menunjukkan bahwa ekspresi gen *pr-1* terdeteksi dalam respons pertahanan tanaman terhadap virus, bakteri, dan jamur, dimana efek dari anti patogen PR-1 ini telah diverifikasi tidak hanya secara *in vitro* tetapi juga secara *in vivo*. Sifat penghambat patogen yang dimiliki oleh PR-1 terletak pada kemampuannya yang dapat menebalkan dinding sel tanaman, berinteraksi dengan fitotoksin, serta menimbulkan respons hipersensitif bagi tanaman yang diserang. Salah satu peran dari adanya gen CmPR1 ini terbukti dapat meningkatkan resistensi tanaman labu (*Cucurbita muscata Dusch*) terhadap penyakit embun tepung (Guo *et al.*, 2023). Akan tetapi, karakterisasi dan fungsi spesifik gen PR-1 pada tanaman pangan lokal Indonesia seperti padi, jagung, dan kedelai masih terbatas, padahal tanaman ini menghadapi berbagai tekanan biotik dan abiotik yang khas di iklim tropis dan agroekosistem Indonesia. Kondisi agroklimat Indonesia yang panas dan lembab menciptakan tekanan

biotik dan abiotik yang unik, seperti tingginya keanekaragaman patogen dan fluktuasi kelembaban, yang memengaruhi pola ekspresi dan fungsi PR-1. Sebagian besar studi yang menelaah fungsi PR-1 berasal dari tanaman model seperti *Nicotiana tabacum* (tembakau) dan *Arabidopsis thaliana*, di mana PR-1 diidentifikasi sebagai penanda utama sistemik akuisisi resistensi (SAR) dan memiliki aktivitas antimikroba yang jelas. Namun, efektivitas PR-1 pada tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan gandum menunjukkan variasi yang lebih kompleks. Selain itu, kajian ketahanan penyakit di tingkat lokal masih sangat minim, padahal hal ini dapat mempercepat peningkatan produktivitas dan keberlanjutan pertanian nasional.

Gen *pr-1* sangat penting dalam upaya rekayasa tanaman tahan penyakit karena berperan langsung dalam pertahanan tanaman dan meningkatkan kemampuan tanaman melawan infeksi patogen. Meskipun peran dari gen *pr-1* sebagai protein pertahanan umum telah diketahui, tetapi mekanisme spesifik bagaimana *pr-1* merespons berbagai jenis patogen pada berbagai tanaman masih kurang dikaji dalam berbagai penelitian. Maka dari itu, perlu dilakukan analisis mendalam terkait peran gen *pr-1* meresistensi tanaman untuk dimanfaatkan dalam bioteknologi pertanian, dan bagaimana mekanisme spesifik gen *pr-1* pada tanaman dalam melawan cekaman stres biotik maupun abiotik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peran gen *pr-1* (*Pathogenesis Associated Proteins-1*) terhadap ketahanan tanaman dan implikasinya terhadap bioteknologi pertanian.

METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah studi kepustakaan atau tinjauan literatur dengan pendekatan kualitatif. Studi kepustakaan merupakan metode penelitian dengan mengumpulkan, menelaah dan mensintesis hasil penelitian relevan dengan data yang telah ada sebelumnya (Hardinah *et al.*, 2025). Kegiatan penelitian ini dilakukan melalui proses pengumpulan informasi dan data melalui berbagai sumber literatur yang relevan seperti buku referensi, hasil penelitian yang sejenis, artikel dan berbagai penelitian yang berkaitan dengan variabel yang diteliti. Teknik pengumpulan data yang digunakan adalah penelusuran jurnal ilmiah melalui database pengindeks *Google Cendekia* yang dilakukan secara bertahap sejak bulan Maret 2025 dengan menggunakan kata kunci Ekspresi Gen, *Pathogenesis Related Proteins*, dan Resistensi Tanaman. Artikel yang digunakan sebagai tinjauan literatur merupakan artikel nasional terindeks SINTA dengan rentang penerbitan antara tahun 2019-2024 dan artikel internasional terindeks scopus dengan rentang penerbitan antara tahun 2015-2024. Tujuan pelaksanaan penelitian literatur ini adalah untuk mengumpulkan informasi tentang peran gen *pr-1*, mekanisme kerja gen dalam meresistensi tanaman serta implikasi gen pada bioteknologi pertanian. Data yang dikumpulkan dari studi kepustakaan akan dianalisis secara kualitatif untuk mendapatkan pemahaman menyeluruh tentang permasalahan dalam penelitian sekaligus melakukan interpretasi agar topik pembahasan lebih mudah untuk dipahami.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Resistensi Tanaman

Resistensi tanaman adalah kemampuan suatu tanaman untuk melawan infeksi patogen dengan cara mengaktifkan mekanisme pertahanan (Fahmi *et al.*, 2024). Resistensi tanaman merupakan sebuah sistem yang terdiri dari makromolekul kompleks yang berperan dalam menjaga pertahanan tubuh tanaman. Kekebalan tanaman

melibatkan beberapa lapisan respons pertahanan yang akan diaktifkan apabila ada deteksi PAMP (*Pathogen-Associated Molecular Pattern*), MAMP (*Microbe-Associated Molecular Pattern*) dan stres lingkungan yang dikenali sebagai benda asing oleh reseptor pengenalan tanaman (Kattupalli *et al.*, 2021). Deteksi patogen yang dianggap sebagai benda asing ini akan memicu tanaman untuk mengaktifkan sistem kekebalan tubuhnya.

Tabel 1. Hasil Eksperimen Literatur Primer Ekspresi Gen *PR-1*

Penulis	Jenis Patogen	Hormon Terkait	Respons Ekspresi PR-1	Mekanisme Aksi PR-1
Ali <i>et al.</i> (2018)	Berbagai patogen (jamur, bakteri)	SA, JA	PR-1 meningkat sebagai bagian dari jalur SAR	PR-1 memediasi resistensi sistemik dan memperkuat pertahanan tanaman
Li <i>et al.</i> (2021)	Fusarium solani (jamur patogen akar)	Methyl jasmonate (MeJA), Salicylic acid (SA), Ethephon, H ₂ O ₂	Ekspresi PR-1 diinduksi oleh berbagai hormon dan infeksi	Protein PR-1 memiliki aktivitas ribonuklease, berperan menghambat pertumbuhan patogen dan meningkatkan resistensi
Orpet <i>et al.</i> (2021)	Cacopsylla pyricola (serangga hama) dan Tetranychus spp. (acar)	Salicylic acid (SA) analog (ASM), Harpin	Induksi ekspresi PR-1 dengan aplikasi elicitor tanaman	PR-1 terlibat dalam sistem resistensi terpadu tanaman, meski aplikasi di lapangan kurang konsisten
AlHudaib <i>et al.</i> (2022)	Oat (Avena sativa) - abiotik dan biotik	SA, JA, Etilen (ET)	AvPR-1 diekspresikan meningkat di bawah stres	PR-1 berperan sebagai protein protektif dan adaptasi terhadap stres lingkungan
Grodetskaya <i>et al.</i> (2022)	Fusarium spp., Alternaria alternata	-	Ekspresi PR-1 meningkat saat infeksi dan nanopartikel CuO	PR-1 membantu meningkatkan ketahanan tanaman melalui ekspresi gen pertahanan
Ma <i>et al.</i> (2022)	Setosphaeria turcica (jamur patogen jagung)	SA, ABA, MeJA, H ₂ O ₂	ZmPR-1 diinduksi oleh infeksi patogen dan hormon	PR-1 berperan sebagai marker resistensi dan berpotensi antifungal
Silva <i>et al.</i> (2022)	Berbagai patogen biotik dan abiotik pada kedelai (Glycine max)	Salicylic acid (SA), Jasmonic acid (JA), Absciscic acid (ABA)	24 gen PR-1 di kedelai diinduksi secara spesifik terhadap stres biotik dan abiotik	PR-1 memodulasi respon pertahanan dan pertumbuhan, berfungsi sebagai penanda SAR dan mekanisme antifungal
Yin <i>et al.</i> (2023)	Blumeria graminis (jamur penyebab powdery mildew)	Salicylic acid (SA), Cold stress	PR-1 diinduksi dengan cepat oleh infeksi jamur dan hormon	PR-1 berfungsi sebagai protein pertahanan yang diinduksi oleh berbagai stimulus stres dan patogen
Zribi <i>et al.</i> (2023)	Durum wheat - berbagai patogen	Asam salisilat (SA), Jasmonat (JA), ABA	Ekspresi PR-1 meningkat saat stres abiotik dan infeksi	PR-1 berperan sebagai protein pertahanan, meningkatkan toleransi stres dan infeksi

Penulis	Jenis Patogen	Hormon Terkait	Respons Ekspresi PR-1	Mekanisme Aksi PR-1
Guo <i>et al.</i> (2023)	<i>Podosphaera xanthii</i> (embun tepung)	Etilen (ET), Jasmonat (JA), SA	Ekspresi CmPR1 meningkat pada infeksi dan perlakuan hormon	PR-1 menginduksi kematian sel dan akumulasi H ₂ O ₂ untuk resistensi
Leiwakabessy <i>et al.</i> (2024)	<i>Xanthomonas oryzae</i> pv. <i>oryzae</i>	SA, Lysinibacillus sphaericus	Ekspresi PR-1 meningkat pada tanaman padi yang diinduksi	PR-1 memicu mekanisme pertahanan lokal dan sistemik, menghambat penyakit
Xi <i>et al.</i> (2024)	Berbagai patogen pada tanaman teh (<i>Camellia sinensis</i>)	JA, SA, ABA	Ekspresi PR-1 meningkat pada stres mekanik dan infeksi	PR-1 memiliki aktivitas antifungal dan ribonuklease, berperan dalam pertahanan terhadap serangan patogen

Kemampuan resistensi tanaman muncul sebagai akibat dari adaptasi tanaman itu sendiri dengan faktor genetik, lingkungan, serta interaksi dengan organisme lain. Umumnya, tanaman akan mengaktifkan kekebalan tubuhnya apabila mengalami stres abiotik maupun biotik. Ancaman-ancaman yang diterima tanaman dari lingkungannya ini secara langsung akan mengaktifkan mekanisme respons hipersensitif (HR), sintesis molekul antimikroba dan protein terkait patogenesis (PR). PR ini akan menginduksi kematian sel yang terprogram untuk menghambat penyebaran infeksi patogen sekaligus berkontribusi pada resistensi tanaman. Hasil studi pustaka yang telah dilakukan menunjukkan bahwa PR-1 merupakan protein pertahanan tanaman yang berperan penting dalam merespons berbagai jenis patogen seperti jamur, bakteri, serangga hama, serta berbagai stres abiotik. Ekspresi PR-1 secara signifikan diatur oleh hormon pertahanan tanaman seperti *salicylic acid*, *jasmonic acid*, dan *methyl jasmonate* yang menginduksi aktivitas antimikroba, antifungal, dan ribonuklease untuk menghambat pertumbuhan patogen. Selain menjadi indikator sistemik akuisisi resistensi (SAR), PR-1 juga berfungsi sebagai target strategis dalam pengembangan tanaman transgenik tahan penyakit. Meskipun mekanismenya bersifat konservatif, respons PR-1 dapat bervariasi tergantung jenis tanaman, patogen, dan kondisi lingkungan, sehingga pemanfaatannya perlu disesuaikan dengan konteks spesifik untuk efektivitas pertahanan yang optimal.

Peran Gen *pr-1*

PR terdiri atas 17 famili yang memiliki karakteristik fungsional masing-masing dalam melawan serangan patogen. Namun, PR-1 merupakan salah satu kelompok protein yang diproduksi paling banyak selama respons pertahanan tanaman dan ada di mana-mana di semua spesies tanaman. Protein ini ditemukan pertama kali pada tahun 1970-an dan berhasil melawan infeksi virus spesies tanaman tembakau yang saat itu terinfeksi virus mosaik tembakau (TMV). Gen *pr-1* merupakan gen yang mengkode protein PR-1 (*Pathogenesis-Related 1*) yang memiliki peran dalam respons pertahanan tanaman terhadap infeksi patogen baik virus, bakteri dan jamur. Aktivitas ekspresi gen *pr-1* dipicu oleh jalur sinyal yang diterima respons pertahanan dan melibatkan asam salisilat (SA).

Penelitian yang dilakukan oleh Grodetzkaya *et al* (2022) menunjukkan bahwa selain gen *pr-1*, gen *pr-10* juga memiliki fungsi yang hampir sama dalam meresistensi tanaman terhadap cekaman stres biotik dan abiotik. Selain itu, ada beberapa jenis gen yang berperan dalam resistensi tanaman seperti yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Gen Ketahanan Stres

Gen	Urutan (5' – 3')
DREB2	F: AGGCAGAGAACATGGGGAAA R: GAAAGTTGAGGCGAGCGTAA
MYB46	F: GATGTCGCTAGAAATGCCGG R: GTTGTCTGTACGCCCTGG
PAL	F: CTGTGGCTGCAACGGTTT R: TCAATTTGAGGTCCGAGCCA
PR-1	F: CCTCAAAGCCCACAATGACG R: TCTCGTCCACCCATAGCTTC
PR-10	F: GGCCCGGAACCATTAAGAAG R: CCACCCTCGATCAAGCTGTA
GAPDH	F: CAGCCGAAGATGTCAATGCA R: GGCCACTTGTTTGCTACCAA

Sumber: Grodetzkaya *et al* (2022)

Berdasarkan Tabel 2, terdapat dua jenis gen dalam famili *Pathogenesis-Related* yang memiliki peran besar dalam menjaga ketahanan tanaman. Menurut Ali *et al* (2018), famili gen *pr-1* dan *pr-10* memiliki homologi dalam urutan nukleotida DNA sehingga memiliki fungsi mekanisme pertahanan tanaman yang mirip. Akan tetapi yang membedakan jenis gen *pr-1* memiliki spesifikasi pertahanan tanaman terhadap infeksi patogen khususnya jamur dan bakteri (stress biotik). Sementara itu, gen *pr-10* fokus pada respons stres abiotik misalnya kekeringan dan suhu yang ekstrem. Protein PR (*pathogenesis-related*) adalah protein termotabil yang memiliki berat molekul 5-43kDa. PR merupakan sekelompok protein yang terakumulasi pada tanaman selama proses pematangan tanaman, ekspresi gen, pembungaan, plasmolisis, dan penuaan. Protein PR terakumulasi setelah terjadinya infeksi patogen pada tanaman. Protein ini akan mengendalikan produksi tanaman dari berbagai senyawa atau protein untuk mencegah terjadinya penyebaran infeksi patogen. Dengan adanya protein PR maka dapat meningkatkan toleransi tanaman untuk melindungi diri dari serangan patogen. Klasifikasi, sifat dan sumber famili protein PR dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi Famili Protein PR

Jenis Protein PR	Nomor Akses Gen	Fungsi	Sumber
PR1	Y00707	Antijamur	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)
PR2	M59443.1	γ-1,3-glukanase	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)
PR3	X77111.1	Kitinase Kelas I, II, IV, V, VI, VII	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)
PR4	NW_015888419.1	Kitinase Kelas I, II	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)
PR5	NW_015793016	Protein mirip thaumatin	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)
PR6	NW_004196001.1	Penghambat proteinase	<i>Solanum lycopersicum</i> (Tomat)
PR7	NC_015445.2	Endoproteinase	<i>Solanum lycopersicum</i> (Tomat)

Jenis Protein PR	Nomor Akses Gen	Fungsi	Sumber
PR8	NC_026660.1 EC	Kitinase Kelas III	<i>Cucumis sativus</i> (Mentimun)
PR9	1.11.1.7	Peroksidase	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)
PR10	NC_026940.1 gi	Protein mirip ribonuklease	<i>Petroselinum crispum</i> (Peterseli)
PR11	899342	Kelas I Kitinase	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)
PR12	NC_025209.1 gi	Pertahanan	<i>Raphanus raphanistrum</i> (Lobak)
PR13	1181531 gi	Tionin	<i>Arabidopsis thaliana</i>
PR14	1045201 gi	Protein pemindah lipid	<i>Hordeum vulgare</i> (Barley)
PR15	2266668 gi	Oksalat oksidase	<i>Hordeum vulgare</i> (Barley)
PR16	1070358	Seperti oksidase	<i>Hordeum vulgare</i> (Barley)
PR17	–	Antijamur dan antivirus	<i>Nicotiana tabacum</i> (Tembakau)

Sumber: Ali *et al* (2018)

Klasifikasi famili pada Tabel 3 menunjukkan bahwa mayoritas famili *Pathogenesis-Related Protein* memiliki sifat antijamur dan jenis PR yang ditemukan paling banyak diidentifikasi dari tanaman *Nicotiana tabacum* (Tembakau). Penelitian yang dilakukan oleh Xi *et al* (2024) tentang identifikasi gen PR pada tanaman teh mendukung temuan di atas dimana menunjukkan bahwa famili protein PR-1, PR-4 dan PR-5 memiliki sifat antijamur yang dominan. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa pola ekspresi gen akan muncul apabila ada cekaman stres biotik dan abiotik yang menyerang dinding sel tanaman. Dari kedua penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa famili PR memiliki kemampuan untuk menghadapi respons lingkungan. Gen dominan yang diidentifikasi pada tanaman tembakau juga memainkan peran penting dalam menghadapi stres biotik dan abiotik pada tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan gandum. Ma *et al* (2022) menemukan bahwa gen ZmPR-1 diinduksi oleh infeksi patogen serta hormon pertahanan seperti SA dan MeJA, berperan dalam mekanisme antijamur pada tanaman jagung, Farrakh *et al* (2018) menunjukkan bahwa PR-1 terlibat dalam resistensi terhadap jamur penyebab penyakit *stripe rust* tanaman gandum dengan ekspresi yang diatur oleh *salicylic acid*. Sementara pada tanaman padi, Leiwakabessy *et al* (2024) mengkonfirmasi bahwa PR-1 juga sangat berperan dalam pertahanan tanaman pangan utama terhadap bakteri patogen *Xanthomonas oryzae pv. oryzae*. Dengan demikian, PR-1 adalah komponen kunci pertahanan tanaman yang berfungsi luas pada berbagai jenis tanaman pangan utama, tidak hanya terhadap jamur tapi juga bakteri patogen.

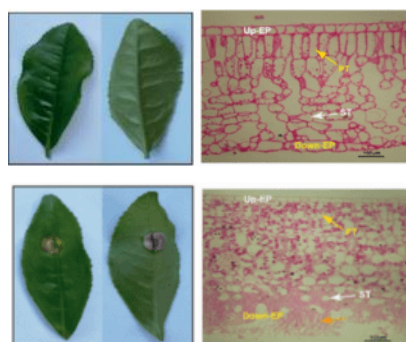
PR-1 adalah protein yang terdapat di berbagai organ tanaman, yang digunakan sebagai penanda untuk resistensi dengan cara menginduksi kematian sel, sehingga dapat mengurangi pertumbuhan patogen terhadap tanaman. PR-1 memiliki aktivitas antibakteri, antivirus, antijamur, antinematoda, dan antiinsektisida. Beberapa contoh pengaplikasian gen *pr-1* ini bisa ditemukan pada tanaman bawang putih (*Allium sativum* L) yang diinduksi oleh tiga gen berbeda yaitu *pr-1*, *pr-3* dan *pr-5* yang meningkatkan ketahanan tanaman terhadap infeksi jamur, tomat (*Solanum lycopersicum*) meningkatkan ketahanan terhadap bakteri dan jamur, jagung (*Zea mays*) untuk meningkatkan

ketahanan dari serangan jamur *Setosphaeria turcica* dan pepaya (*Carica papaya*) yang meningkatkan ketahanan terhadap infeksi virus.

Peran utama gen *pr-1* adalah sebagai sistem pertahanan terhadap serangan patogen dengan cara menebalkan dinding sel tanaman, memberikan resistensi sistematis yang apabila tanaman terinfeksi akan mengirim sinyal pertahanan ke seluruh bagian lain tanaman untuk mempersiapkan respons pertahanan lebih lanjut, menginduksi aktivitas enzimatis dan membatasi penyebaran patogen ke bagian lain dari tanaman. Selain memiliki peran utama dalam pertahanan terhadap stres biotik yang melibatkan ancaman patogen, penyakit atau kompetitor, gen *pr-1* juga memiliki peran dalam merespons berbagai jenis stres abiotik pada tanaman seperti salinitas, sinar UV, dan kekeringan. Misalnya pada penelitian yang dilakukan oleh Yin *et al* (2023) kasus tanaman tembakau selain mampu meningkatkan ketahanan dalam melawan patogen namun juga bisa meningkatkan toleransi tembakau terhadap stres logam berat.

Mekanisme Meresistensi Tanaman Dengan Gen *pr-1*

Salah satu ancaman terbesar tanaman adalah adanya stres biotik yang disebabkan oleh hama, penyakit tanaman maupun kompetisi dengan tanaman lain. Peningkatan resistensi tanaman terhadap permasalahan biotik (penyakit tanaman) terjadi melalui induksi overekspresi gen *pr-1* (*pathogenesis-related protein 1*) yang memodulasi tingkat spesies oksigen reaktif terhadap serangan patogen. Penelitian yang dilakukan oleh Zribi *et al* (2023) membuktikan bahwa protein PR-1 akan diinduksi dan terakumulasi di dalam tubuh tanaman selama serangan jamur, bakteri dan virus terjadi. Gen *pr-1* akan mengendalikan produksi tanaman untuk menghasilkan protein, peptida dan senyawa lain yang mampu mencegah infeksi patogen. Menurut Ma *et al* (2022), ekspresi gen *pr-1* diatur oleh hormon asam salisilat (SA), asam absisat (ABA), asam jasmonat (JA), benzothiadiazole (BTH) dan asam isonicotinic (INA). Penelitian yang telah dilakukan oleh Zhang *et al* (2022) yang menganalisis respons tanaman teh terhadap stres penyakit *Blister-Blight* menggambarkan kondisi tanaman pra dan pasca terserang infeksi.



Gambar 1. Morfologi dan Histologi Daun Sebelum dan Setelah Terinfeksi Penyakit (Sumber: Zhang *et al.*, 2022)

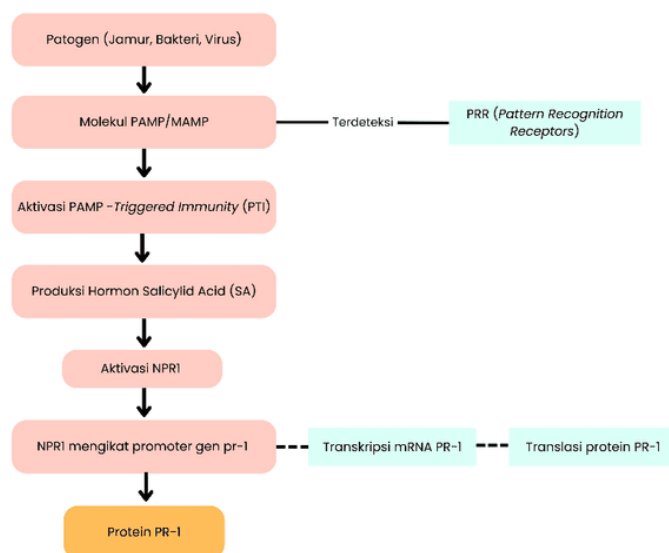
Tanaman yang mulai terserang infeksi patogen akan mengatur ekspresi gen untuk merespons sinyal yang berasal dari patogen. Pada tanaman, gen *pr-1* diinduksi oleh asam salisilat (SA) yang menandai mulanya respons pertahanan tanaman. Protein PR-1 yang dihasilkan oleh gen *pr-1* terlokalisasi pada vakuola untuk mengatur adanya stres biotik maupun abiotik yang diterima tanaman dari lingkungannya. Setelah patogen menyerang, protein PR-1 akan mengisolasi patogen yang mengakibatkan penghambatan pertumbuhan pada tanaman. Menurut Lin *et al* (2023), protein PR-1 mengandung motif CNYx yang mampu melepaskan 11 peptida asam amino. Peptida inilah yang berperan

dalam meningkatkan kekebalan tanaman dan mengatur toleransi stres pada tanaman. Protein PR-1 telah diidentifikasi pada beberapa spesies tanaman dan umumnya bersifat asam maupun basa. Keberadaan protein PR-1 ini sebagian besar disekresikan ke apoplas dan beberapa disimpan di dalam vakuola (Silva & Venancio, 2021).

Tabel 4. Ringkasan Perbandingan Peran PR-1 terhadap Jenis Stres, Lokasi Ekspresi, dan Jalur Sinyal

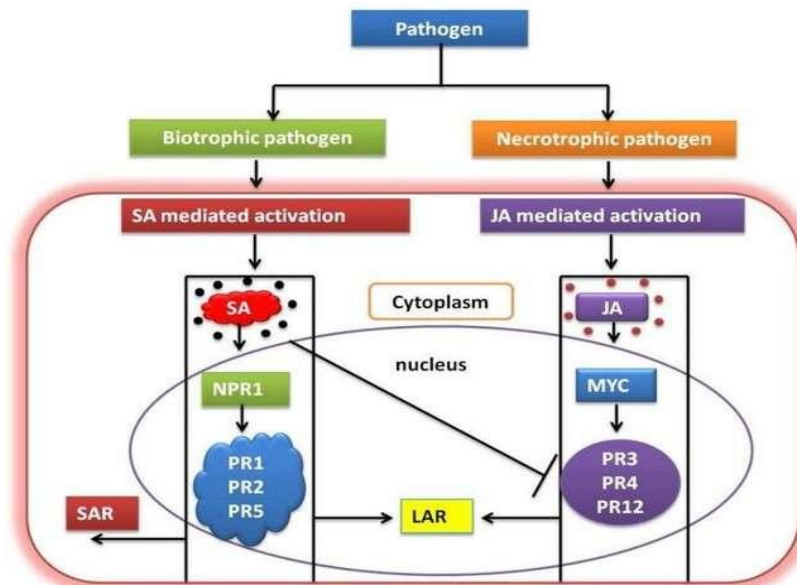
Jenis Stres	Lokasi Ekspresi Protein PR-1	Jalur Sinyal Utama	Peran PR-1 Utama
Stres Biotik (patogen)	Apoplas dan vakuola	Salicylic Acid (SA) → NPR1	Hambat penyebaran patogen, penguatan dinding sel
Stres Abiotik (kekeringan, dingin, dan sejenisnya)	Vakuola, kadang sitoplasma	SA, ABA, JA	Meningkatkan toleransi stres, pengaturan respon
Infeksi Virus	Apoplas	SA, jasmonic acid (JA)	Induksi protein antiviral dan pertahanan umum

Mekanisme resistensi tanaman dimulai dengan pengenalan patogen PAMP dan MAMP yaitu sebuah molekul yang biasa ditemukan pada bakteri atau jamur. Pada permukaan sel tanaman PRR (*Pattern Recognition Receptors*) akan mendeteksi PAMP/MAMP tersebut. Selanjutnya tumbuhan akan mengeluarkan sinyal ke seluruh bagian tanaman untuk melepaskan enzim-enzim yang bertindak sebagai perlawanan terhadap patogen yang dikenal dengan PTI (*PAMP-Triggered Immunity*). Setelah pengenalan patogen, tanaman akan memproduksi hormon SA untuk memicu ekspresi gen *pr-1*. Setelah SA diproduksi, komponen jalur sinyal pertahanan NPR1 (*Non-Expressor of Pathogenesis-Related Genes 1*) akan mengaktifkan ekspresi gen yang terlibat dalam pertahanan termasuk gen *pr-1*. NPR1 akan mengikat promotor gen *pr-1* untuk membentuk mRNA PR-1 untuk selanjutnya diterjemahkan menjadi protein PR-1. Protein inilah yang nantinya akan menjadi proteksi pertahanan tanaman terhadap serangan patogen. Bagan mekanisme jalur induksi gen *pr-1* disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme Induksi Gen *pr-1*

Protein PR-1 akan berperan dalam menghambat pergerakan patogen ke dalam jaringan dinding sel tanaman, memperkuat dinding sel tanaman dan meningkatkan respons pertahanan lokal secara menyeluruh ke bagian lain tanaman melalui resistensi sistemik (SAR) agar bersiap dalam menghadapi patogen yang mungkin menyerang bagian lain dari tanaman. Aktivitas persinyalan tanaman dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Aktivasi Persinyalan Tanaman Setelah Infeksi Patogen (Sumber: Ali *et al.*, 2018)

Menurut Ali *et al* (2018), jalur aktivasi tanaman dalam menerima sinyal patogen yang mulai menginfeksi jaringan terdiri atas dua yaitu jalur persinyalan asam salisilat (SA) dan asam jasmonat (JA). Patogen jenis biotrofik akan mengaktifkan jalur SA yang merangsang transkripsi NPR1 untuk membentuk mRNA PR-1 kemudian diterjemahkan menjadi protein PR-1 kemudian mengarah pada resistensi sistemik (SAR). Sementara itu, patogen jenis nekrotrofik akan menstimulasi jalur JA untuk menginduksi aktivasi gen *pr-3*, *pr-4* dan *pr-12*.

Peran protein PR-1 yang mengganggu permeabilitas membran sel patogen akan mengurangi kemampuan patogen untuk berkembang biak sehingga infeksi patogen pada tanaman dapat diminimalisir. Ekspresi gen *pr-1* bersifat sementara yang hanya dapat diaktifkan apabila terjadi infeksi atau stres biotik maupun abiotik yang dialami oleh tanaman. Ekspresi gen *pr-1* akan kembali dalam kondisi normal setelah infeksi mereda dan tidak bertahan dari satu musim ke musim lainnya terkecuali jika ada infeksi berkelanjutan yang mendorong gen *pr-1* untuk terus melakukan induksi.

Respons Pertahanan Tanaman yang Dimediasi oleh gen *pr-1*

Lapisan pertahanan tubuh tanaman akan aktif apabila dipicu oleh munculnya sinyal PAMP dan MAMP sebagai indikasi adanya serangan patogen pada salah satu organ tanaman. Tanaman merespons ancaman patogen dengan mengaktifkan pertahanan struktural untuk menghasilkan resistensi lokal dan sistemik dengan tujuan untuk mengurangi kerusakan di masa yang akan datang (Orpet *et al.*, 2021). Gen *pr-1* berperan besar dalam sistem pertahanan tanaman baik secara lokal maupun sistemik. Protein PR-1 diinduksi dan terakumulasi di dalam tanaman selama serangan patogen (jamur, bakteri, virus atau serangga) menyerang salah satu organ tanaman. Apabila gen *pr-1* telah berhasil

melakukan ekspresi dan penerjemahan untuk mengaktifkan protein PR-1 maka organ tubuh tanaman akan secara langsung merespons dengan melakukan penguatan dinding sel tanaman, menghambat aktivitas enzim patogen dan meningkatkan ketahanan lokal tanaman terhadap serangan patogen.

Respons pertahanan tanaman yang di mediasi oleh gen *pr-1* akan secara langsung menebalkan dinding sel tanaman apabila tanaman terserang infeksi patogen membuat patogen sulit dalam menembus dan menginfeksi jaringan tanaman. Penguatan dinding sel tanaman ini dilakukan oleh protein PR-1 yang akan menjalin komunikasi dengan pektin dan selulosa sehingga dinding sel tanaman tahan terhadap penetrasi patogen. Selama proses penebalan dinding sel, protein PR-1 sebagai eksekutor akan menginduksi ekspresi enzim antimikroba (*protease inhibitor*) sehingga aktivitas enzimatik patogen seperti enzim *cellulase* dan *protease* akan terhambat. Apabila salah satu jaringan tanaman telah terinfeksi oleh patogen, sistem pertahanan tubuh akan melakukan induksi resistensi sistemik yang akan mengirim sinyal untuk mengaktifkan gen pertahanan di seluruh bagian tanaman. Ekspresi gen *pr-1* akan menyebar pada jaringan yang sehat untuk menghasilkan pertahanan lanjutan dan menghindari adanya ancaman penyebaran infeksi. Dalam proses ini, SAR (*Systemic Acquired Resistance*) akan membantu dalam meningkatkan ketahanan pada bagian yang lain dalam jaringan tanaman.

Implikasi Penggunaan *pr-1* Terhadap Bioteknologi Pertanian

Saat ini pertanian modern menghadapi tantangan besar untuk menghasilkan hasil panen dengan kualitas tinggi. Salah satu upaya untuk memastikan kualitas hasil panen adalah dengan melindungi tanaman dari adanya ancaman patogen, penyakit maupun penggunaan pestisida berbahaya yang bisa memberikan dampak buruk pada lingkungan (Mian *et al.*, 2024). Peran gen-gen pertahanan tanaman merupakan solusi untuk mempertahankan kualitas hasil panen. Pada era perkembangan bioteknologi, ada banyak penggunaan gen yang bisa dijadikan alternatif untuk meningkatkan ketahanan tanaman. Salah satunya adalah gen *bt* yang berasal dari bakteri *Bacillus thuringiensis* yang mampu menghasilkan protein beracun untuk membunuh hama (Arsi *et al.*, 2019). Namun demikian, gen pertahanan tanaman juga bisa dihasilkan dari gen bawaan yang berasal dari genom tanaman itu sendiri misalnya gen *pr-1*. Keberadaan gen *pr-1* memberikan manfaat sekaligus tantangan dalam bioteknologi pertanian.

Pathogenesis Related Protein (PR-1) merupakan kunci utama dari mekanisme kompleks untuk melindungi diri dari patogen pada tumbuhan dan diaktifkan sebagai respons dalam melindungi tumbuhan dari serangan patogen. *Pr-1* merupakan gen yang berperan penting dalam metabolisme tanaman sebagai bentuk respons terhadap cekaman biotik dan abiotik dalam melindungi tanaman dari kerusakan yang terjadi (Farrakh *et al.*, 2018). Gen ini berfungsi dalam mengatur produksi beberapa protein dan senyawa yang beracun bagi patogen atau mencegah terjadinya infeksi patogen dimana gen tersebut berasal (Li *et al.*, 2021). Dalam rekayasa genetika tanaman modern, gen *pr-1* dimanfaatkan sebagai target strategis untuk mengembangkan varietas tanaman yang tahan terhadap berbagai serangan penyakit sekaligus mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang menantang.

Salah satu aplikasi nyata dalam pengembangan tanaman transgenik adalah mengoverekspresikan gen PR-1 untuk meningkatkan ketahanan terhadap patogen jamur, bakteri, dan virus. Misalnya, tanaman padi varietas IR64 telah berhasil diresistensi melalui aplikasi biokontrol berupa bakteri endofit *Lysinibacillus sphaericus* dan

pemberian asam salisilat yang memicu ekspresi gen *pr-1* secara signifikan (Leiwakabessy *et al.*, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa induksi gen PR-1 secara eksogen dapat memperkuat pertahanan tanaman secara lokal dan sistemik. Implikasi gen *pr-1* dalam bioteknologi pertanian dapat menjadi alternatif untuk menciptakan varietas tanaman yang bisa menahan berbagai tekanan dari lingkungan. Seperti halnya dalam meningkatkan pertahanan tanaman padi terhadap patogen. Selain itu, tanaman pangan utama lainnya seperti jagung dan gandum juga telah dikembangkan varietas transgenik yang memanfaatkan gen *pr-1* untuk meningkatkan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik (Ma *et al.*, 2022; Alhudaib *et al.*, 2022). Gen PR-1 bekerja dengan mengatur produksi protein, peptida, dan senyawa antimikroba yang mampu menghambat pertumbuhan patogen serta memperkuat dinding sel tanaman sebagai barier fisik pertahanan.

Teknologi rekayasa gen seperti pengembangan CRISPR-Cas9 memberikan peluang untuk memperbaiki regulasi ekspresi gen *pr-1* secara presisi, baik dengan meningkatkan aktivitas gen tersebut maupun dengan menghilangkan hambatan genetik yang membatasi ekspresinya. Menurut Sophia *et al.* (2023) CRISPR/Cas9 memungkinkan modifikasi genetik tanaman budidaya dengan cepat dan tepat, seperti meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap stres lingkungan (abiotik), serta perbaikan kandungan nutrisi dan hasil panen. Teknologi seperti ini mampu membuka jalan bagi perbaikan tanaman yang lebih cepat, aman, dan diterima secara luas, yang akan berdampak positif pada ketahanan pangan dan keberlanjutan pertanian.

KESIMPULAN

Gen *pr-1* merupakan famili dari PR (*Pathogenesis-Related*) yang memiliki kemampuan dalam meresistensi tanaman terhadap stres biotik (patogen, penyakit atau kompetitor) dan abiotik (salinitas, sinar UV dan kekeringan). Mekanisme resistensi gen *pr-1* akan aktif apabila PRR mendeteksi adanya PAMP (*Pathogen-Associated Molecular Pattern*) atau MAMP (*Microbe-Associated Molecular Pattern*) yang mulai menginfeksi jaringan tanaman. Jalur penerimaan sinyal pertahanan untuk gen *pr-1* melalui asam salisilat (SA) untuk merangsang NPR1 melakukan transkripsi dan menerjemahkan mRNA PR-1 menjadi protein PR-1. Resistensi tanaman selanjutnya akan diarahkan pada induksi resistensi sistemik (SAR) untuk melindungi keseluruhan jaringan tanaman pada bagian lain. Tanaman yang dimediasi oleh gen *pr-1* akan merespons dengan melakukan penebalan dinding sel, menghambat aktivitas enzim dan meningkatkan pertahanan lokal pada jaringan yang tidak terinfeksi. Mayoritas spesies tanaman memiliki gen *pr-1* hanya saja mekanisme regulasi ekspresi gen berbeda-beda bergantung pada kondisi lingkungan tanaman tersebut.

REFERENSI

- AlHudaib, K. A., Alanazi, N. A., Ghorbel, M., El-Ganainy, S. M., & Brini, F. (2022). Isolation and Characterization of a Novel Pathogenesis-Related Protein-1 Gene (AvPR-1) with Induced Expression in Oat (*Avena sativa* L.) during Abiotic and Hormonal Stresses. *Plants*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/plants11172284>
- Ali, M. S., Ali, I., Pirzada, R. H., Tahir, M. J., Asif, S., & Ahmad, S. (2018). Identification and expression analysis of a homologue of PR-1 gene in *Sorghum bicolor*. *International Journal of Agriculture and Biology*, 20(6), 1318–1324. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0639>

- Ali, S., Ganai, B. A., Kamili, A. N., Bhat, A. A., Mir, Z. A., Bhat, J. A., Tyagi, A., Islam, S. T., Mushtaq, M., Yadav, P., Rawat, S., & Grover, A. (2018). Pathogenesis-related proteins and peptides as promising tools for engineering plants with multiple stress tolerance. In *Microbiological Research* (Vols. 212–213, pp. 29–37). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.04.008>
- Ali, S., Mir, Z. A., Bhat, J. A., Tyagi, A., Chandrashekar, N., Yadav, P., & Grover, A. (2018). Isolation and characterization of systemic acquired resistance marker gene PR1 and its promoter from *Brassica juncea*, 8, 1-14
- Almeida-Silva, F., & Venancio, T.M. (2022). Pathogenesis-related protein 1 (PR-1) genes in soybean: genome-wide identification, structural analysis and expression profiling under multiple biotic and abiotic stresses. *Gene*, 809,146013
- Arsi, A., Pujiastuti, Y., Herlinda, S., Shk, S., & Gunawan, B. (2019). Efikasi Bakteri Entomopatogen *Bacillus thuringiensis* Barliner sebagai Agens Hayati Spodoptera litura Fabricus pada Lahan Pasang Surut dan Rawa Lebak. In S. Herlinda (Ed.), *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal* (pp. 978–979).
- Chandrashekar, N., Ali, S., & Grover, A. (2018). Exploring expression patterns of PR-1, PR-2, PR-3, and PR-12 like genes in *Arabidopsis thaliana* upon *Alternaria brassicae* inoculation. *3 Biotech*, 8, 1-10.
- Fahmi, R. B., Suganda, T., & Yulia, E. (2024). Potensi Minyak Atsiri Biji Adas dalam Menginduksi Resistensi Tanaman Cabai (*Capsicum annum* L.) terhadap Penyakit Antraknosa (*Colletotrichum acutatum* J. H. Simmonds). *Jurnal Agrikultura*, 35(2), 213–226.
- Fang, L.-J., Qin, R.-L., Liu, Z., Liu, C.-R., Gai, Y.-P., & Ji, X.-L. (2019). Expression and functional analysis of a PR-1 Gene, MuPR1, involved in disease resistance mulberry (*Morus* response in *multicaulis*). *Journal of Plant Interactions*, 14(1), 376–385. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1640295>
- Farrakh, S., Wang, M., & Chen, X. (2018). Pathogenesis-related protein genes involved in race-specific all-stage resistance and non-race specific high-temperature adult-plant resistance to *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(11), 2478–2491. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61853-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61853-7)
- Figueroa, M., Hammond-Kosack, K. E., & Solomon, P. S. (2018). A review of wheat diseases—a field *3 Biotech* perspective. *Molecular Plant Pathology*, 19(6), 1523–1536. <https://doi.org/10.1111/mpp.12618>
- Gall, H. L., Philippe, F., Domon, J. M., Gillet, F., Pelloux, J., & Rayon, C. (2015). Cell wall metabolism in response to abiotic stress. In *Plants* (Vol. 4, Issue 1, pp. 112–166). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants4010112>
- Gull, A., Lone, A. A., & Wani, N. U. I. (2019). In abiotic and biotic stresses in plants. *IntechOpen*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85832>
- Grodetskaya, T. A., Evlakov, P. M., Fedorova, O. A., Mikhin, V. I., Zakharova, O. V., Kolesnikov, E. A., Evtushenko, N. A., & Gusev, A. A. (2022). Influence of Copper Oxide Nanoparticles on Gene Expression of Birch Clones In Vitro under Stress Caused by Phytopathogens. *Nanomaterials*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/nano12050864>

- Guo, W. L., Yang, H. L., Zhao, J. P., Bian, S. J., Guo, Y. Y., Chen, X. J., & Li, X. Z. (2023). A Pathogenesis-Related Protein 1 of *Cucurbita moschata* responds to powdery mildew infection. *Frontiers in Genetics*, *14*, 1168138. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1168138>
- Hardinah, N. A., Miranda, S., & Melisa, A. O. (2025). Tinjauan Literatur: Penerapan Model Pembelajaran Berbasis Proyek untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kreatif Siswa pada Pembelajaran Biologi SMA. *Spizaetus: Jurnal Biologi Dan Pendidikan Biologi*, *6*(1), 167–179. <https://doi.org/10.55241/spibio.v6i1.533>
- Kattupalli, D., Sreenivasan, A., & Soniya, E. V. (2021). A genome-wide analysis of pathogenesis-related protein-1 (Pr-1) genes from *piper nigrum* reveals its critical role during *phytophthora capsici* infection. *Genes*, *12*(7). <https://doi.org/10.3390/genes12071007>
- Leiwakabessy, C., Giyanto, G., Muttaqin, K. H., Trikoesoemaningtyas, T., & Talahaturuson, A. (2024). Ekspresi Gen PR-1 Melalui Induksi Ketahanan Tanaman Padi terhadap *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* Menggunakan *Lysinibacillus sphaericus* dan Asam Salisilat. *Agro Bali: Agricultural Journal*, *7*(1), 155–166. <https://doi.org/10.37637/ab.v7i1.1559>
- Li, S., Wang, Z., Tang, B., Zheng, L., Chen, H., Cui, X., Ge, F., & Liu, D. (2021). A Pathogenesis-Related Protein-Like Gene Is Involved in the *Panax notoginseng* Defense Response to the Root Rot Pathogen. *Frontiers in Plant Science*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610176>
- Lin, Y. H., Xu, M. Y., Hsu, C. C., Damei, F. A., Lee, H. C., Tsai, W. L., Hoang, C. V., Chiang, Y. R., & Ma, L. S. (2023). *Ustilago maydis* PR-1-like protein has evolved two distinct domains for dual virulence activities. *Nature Communications*, *14*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41459-4>
- Ma, L., Meng, Q., Shi, F., Liu, J., Li, Y., Liu, C., Liu, X., Su, B., He, C., & Ji, C. (2022). Genome-wide analysis of maize PR-1 gene family and expression profiles induced by plant hormones and fungal phytopathogens. In *Am J Transl Res* (Vol. 14, Issue 11). <http://www.cbs.dtu.dk/services/>
- Mian, G., Belfiore, N., Marcuzzo, P., Spinelli, F., Tomasi, D., & Colautti, A. (2024). Counteracting Grey Mould (*Botrytis cinerea*) in Grapevine ‘Glera’ Using Three Putative Biological Control Agent Strains (*Paraburkholderia* sp., *Pseudomonas* sp., and *Acinetobacter* sp.): Impact on Symptoms, Yield, and Gene Expression. *Microorganisms*, *12*(8). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081515>
- Orpet, R. J., Cooper, W. R., Beers, E. H., & Nottingham, L. B. (2021). Test of plant defense elicitors for arthropod pest suppression and PR-1 gene induction in pear orchards. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, *169*(12), 1137–1146. <https://doi.org/10.1111/eea.13110>
- Silva, F. A., & Venancio, T. M. (2022). Pathogenesis-related protein 1 (PR-1) genes in soybean: Genome-wide identification, structural analysis and expression profiling under multiple biotic and abiotic stresses. *Gene*, *809*. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2021.146013>
- Sophia, Antony, M. J., Aswad Ashan, M., Fadhullah, H., & Jannah, R. M. (2023). Agriculture and Biological Technology Metode CRISPR/CAS dan Minimalisasi Off-Target: Review. *Agriculture and Biological Technology*, *1*(1). <https://journal.stedca.com/index.php/agiotech/>

- Xi, Z., Jia, H., Li, Y., Ma, J., Lu, M., Wang, Z., Kong, D., & Deng, W. W. (2024). Identification and Functional Analysis of PR Genes in Leaves from Variegated Tea Plant (*Camellia sinensis*). *Agronomy*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy14010156>
- Yin, W., Bai, Y., Wang, S., Xu, K., Liang, J., Shang, Q., Sa, W., & Wang, L. (2023). Genome-wide analysis of pathogenesis-related protein-1 (PR-1) genes from Qingke (*Hordeum vulgare* L. var. nudum) reveals their roles in stress responses. *Heliyon*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14899>
- Zhang, Q., Guo, N., Zhang, Y., Yu, Y., & Liu, S. (2022). Genome-Wide Characterization and Expression Analysis of Pathogenesis-Related 1 (PR-1) Gene Family in Tea Plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) in Response to Blister-Blight Disease Stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3). <https://doi.org/10.3390/ijms23031292>
- Zhang, Y., & li, X. (2019). Salicylic acid: biosynthesis, perception, and contributions to plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136952661830116>
- Zribi, I., Ghorbel, M., & Brini, F. (2021). Pathogenesis related proteins (PRs): From cellular mechanisms to plant defense. *Current Protein and Peptide Science*, 22(5), 396-412
- Zribi, I., Ghorbel, M., Haddaji, N., Besbes, M., & Brini, F. (2023). Genome-Wide Identification and Expression Profiling of Pathogenesis-Related Protein 1 (PR-1) Genes in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plants*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/plants12101998>