



Jurnal Agroteknologi

Journal homepage: <https://talenta.usu.ac.id/joa>



Peran Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) dalam Memodulasi Respon Fisiologis dan Biokimia Tanaman Cabai (*Capsicum annuum* L.) terhadap Cekaman Kekeringan: Sebuah Tinjauan

*The Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Modulating Physiological and Biochemical Responses of Chili Pepper (*Capsicum annuum* L.) to Drought Stress: A Review*

Julietta Christy^{*1}, Vira Irma Sari², Rouzatul Nafisah³

¹Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara, Medan, 20155, Indonesia

²Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara, Medan, 20155, Indonesia

³Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara, Medan, 20155, Indonesia

*Corresponding Author: julietachristy@usu.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received : 22 Oktober 2025

Revised : 25 November 2025

Accepted : 29 Desember 2025

Available online

<https://talenta.usu.ac.id/joa>

E-ISSN: [2963-2013](#)

P-ISSN: [2337-6597](#)

How to cite:

Christy, J., Vira, I.S., Rouzatul, N. (2026). Peran Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) dalam Memodulasi Respon Fisiologis dan Biokimia Tanaman Cabai (*Capsicum annuum* L.) terhadap Cekaman Kekeringan: Sebuah Tinjauan. *Jurnal Agroteknologi*. 14(1), 23-31.

ABSTRACT

Drought stress is a major limiting factor in chili pepper cultivation as it directly affects plant growth, physiology, and yield. Common mitigation strategies, such as the use of stress-tolerant varieties and increased chemical inputs, often require high investment costs and may adversely affect environmental quality. Therefore, alternative approaches that are sustainable and environmentally friendly are needed. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) are a group of rhizosphere microorganisms that have the potential to enhance plant tolerance to drought stress through various biological mechanisms. This study aims to examine the role of PGPR in modulating the response of chili plants to drought stress from physiological, biochemical, and hormonal perspectives. The results indicate that PGPR application can enhance chili plant growth under water-deficit conditions by improving root system development, reducing stress-induced ethylene accumulation, increasing antioxidant enzyme activity, and promoting the accumulation of osmolytes such as proline. In addition, PGPR help maintain plant water status and mitigate oxidative stress caused by drought. Overall, PGPR have strong potential to be developed as microbial biostimulants to support sustainable chili cultivation in dryland and arid climate conditions.

Keyword: : PGPR, Chili pepper, *Capsicum annuum*, drought stress

ABSTRAK

Cekaman kekeringan merupakan pembatas dalam budidaya tanaman cabai karena berdampak langsung terhadap pertumbuhan, fisiologi, dan hasil tanaman. Upaya mitigasi yang umum dilakukan, seperti penggunaan varietas toleran dan peningkatan input kimia, sering kali memerlukan biaya tinggi dan berpotensi menurunkan kualitas lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) merupakan kelompok mikroba rizosfer yang berpotensi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan melalui berbagai mekanisme biologis. Penelitian ini bertujuan mengkaji peran PGPR dalam memodulasi respon tanaman cabai terhadap cekaman kekeringan berdasarkan aspek fisiologis, biokimia, dan hormonal. Hasil kajian menunjukkan bahwa aplikasi PGPR mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman cabai pada kondisi defisit air melalui perbaikan sistem perakaran, penurunan akumulasi etilen stres, peningkatan



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.

<https://doi.org/10.32734/ja.v14i1.24604>

aktivitas enzim antioksidan, serta akumulasi osmolit seperti prolin. Selain itu, PGPR berperan dalam menjaga keseimbangan status air tanaman dan mengurangi dampak stres oksidatif akibat kekeringan. Secara keseluruhan, PGPR berpotensi dikembangkan sebagai biostimulan mikroba untuk mendukung budidaya cabai berkelanjutan di lahan dengan kondisi iklim kering.

Keyword PGPR, Cabai, *Capsicum annum*, Cekaman kekeringan

1. Pendahuluan

Cabai merupakan komoditas hortikultura yang sangat strategis di Indonesia. Menurut Firdaus (2021) komoditas pangan strategis adalah komoditas yang dapat dengan mudah dipasarkan dan memiliki dampak yang sangat kuat dalam pembentukan angka inflasi yang dipengaruhi oleh gejolak harga dalam kelompok bahan makanan. Cabai merah merupakan komoditas yang memiliki peluang pasar cukup besar, namun seringkali mengalami fluktuasi harga. Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat konsumsi cabai merah yang relatif tinggi dan akan semakin meningkat pada saat hari-hari besar atau hari raya. Konsumsi rumah tangga di Indonesia terhadap komoditas cabai merah sebesar 1.802 kg/kapita/tahun lebih rendah dari cabai rawit yaitu sebesar 1.807 kg/kapita/tahun (Kementan 2022). Menurut BPS Tahun 2023 produksi cabai merah di Sumatera Utara adalah sebesar 127.451 ton dan merupakan komoditas sayuran dengan produksi tertinggi setelah kubis. Sedangkan untuk produksi di seluruh Indonesia, komoditas cabai merah merupakan komoditas cabai dengan produksi mencapai 1.554.498 ton yang merupakan komoditas dengan produksi tertinggi ke-2 setelah bawang merah.

Cekaman abiotik, khususnya kekeringan, merupakan pembatas utama dalam produktivitas tanaman hortikultura di lahan kering. Cabai termasuk tanaman yang sangat sensitif terhadap defisit air, terutama pada fase generatif (pembungaan dan pembuahan). Anomali iklim akibat fenomena *El Nino* yang melanda wilayah Indonesia semakin memperparah kondisi ini, menyebabkan penurunan hasil yang drastis bahkan kegagalan panen total. Secara fisiologis, kekeringan memicu penutupan stomata yang menghambat asimilasi karbon, sedangkan secara biokimia, kondisi ini meningkatkan produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang memicu kerusakan oksidatif pada sel tanaman.

Menurut Utomo (2002) kendala utama dalam pengelolaan lahan kering, antara lain: lahan kering sangat tergantung pada iklim, lapisan olah tanah dangkal, rentan degradasi (erosi), dan infrastruktur yang terbatas. Menurut Suriadi (2013) budidaya cabai pada lahan kering beriklim kering memerlukan keterampilan dan pengelolaan yang optimal. Penerapan teknologi konservasi air sebagai bentuk adaptasi terhadap perubahan iklim memungkinkan pengembangan budidaya cabai di lahan kering melalui inovasi dalam penanaman cabai.

Upaya penanggulangan kekeringan hingga saat ini masih banyak bertumpu pada pemanfaatan varietas tanaman toleran terhadap cekaman serta pengembangan infrastruktur irigasi yang membutuhkan investasi biaya relatif tinggi. Sementara itu, penerapan input kimia secara intensif untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman pada lahan marginal berpotensi menurunkan kualitas dan kesehatan tanah dalam jangka panjang. Kondisi tersebut menegaskan perlunya pengembangan teknologi alternatif yang berkelanjutan, efisien, dan berwawasan lingkungan. Dalam konteks ini, aplikasi biostimulan berbasis mikroorganisme, terutama *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR), merupakan pendekatan biologis yang prospektif dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan.

Menurut Rahni (2012) *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) berperan penting dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, hasil panen, dan kesuburan tanah. PGPR secara langsung merangsang pertumbuhan tanaman dengan memproduksi hormon pertumbuhan, vitamin, dan berbagai asam organik, serta meningkatkan asupan nutrisi bagi tanaman. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman secara tidak langsung melalui kemampuannya menghasilkan antimikroba patogen yang dapat menekan pertumbuhan jamur penyebab penyakit tanaman (fitopatogenik) dan siderofor.

Tinjauan ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan terkini mengenai peran PGPR dalam meningkatkan toleransi kekeringan pada tanaman cabai. Fokus bahasan mencakup dampak cekaman kekeringan pada tanaman, mekanisme aksi PGPR dalam memitigasi stres, hingga prospek aplikasinya di tingkat lapangan. Diharapkan tinjauan ini dapat menjadi referensi ilmiah dalam pengembangan strategi budidaya hortikultura khususnya tanaman cabai dalam kondisi kekeringan.

2. Dampak Cekaman Kekeringan pada Tanaman Cabai

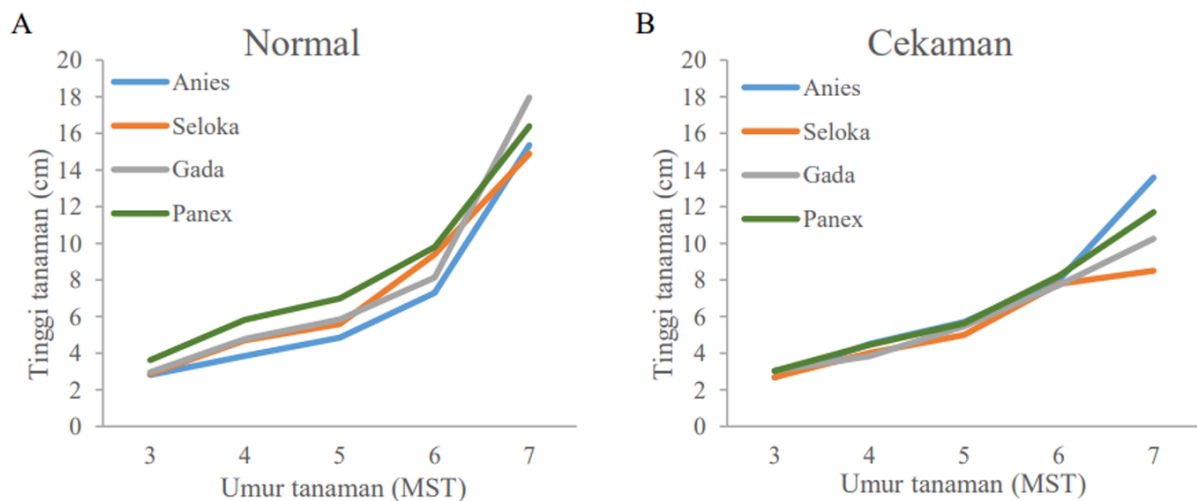
Cekaman kekeringan dapat didefinisikan sebagai kondisi yang terjadi karena berkurangnya kelembaban dan ketersediaan air tanah terutama disekitar daerah perakaran tanaman sehingga menurunkan tingkat absorpsi air dan nutrisi terlarut dari tanah menuju jaringan tanaman melalui perakarannya. Terhambatnya proses ini akan mempengaruhi berbagai proses metabolisme tanaman serta pada akhirnya akan berkontribusi dalam penurunan produktivitasnya (Rini et al, 2020).

Secara umum, tanaman merespons kondisi cekaman kekeringan melalui penurunan laju pertumbuhan, pengurangan aktivitas dan jumlah stomata, perubahan pola respirasi, modifikasi produksi metabolit sekunder, serta perubahan struktur

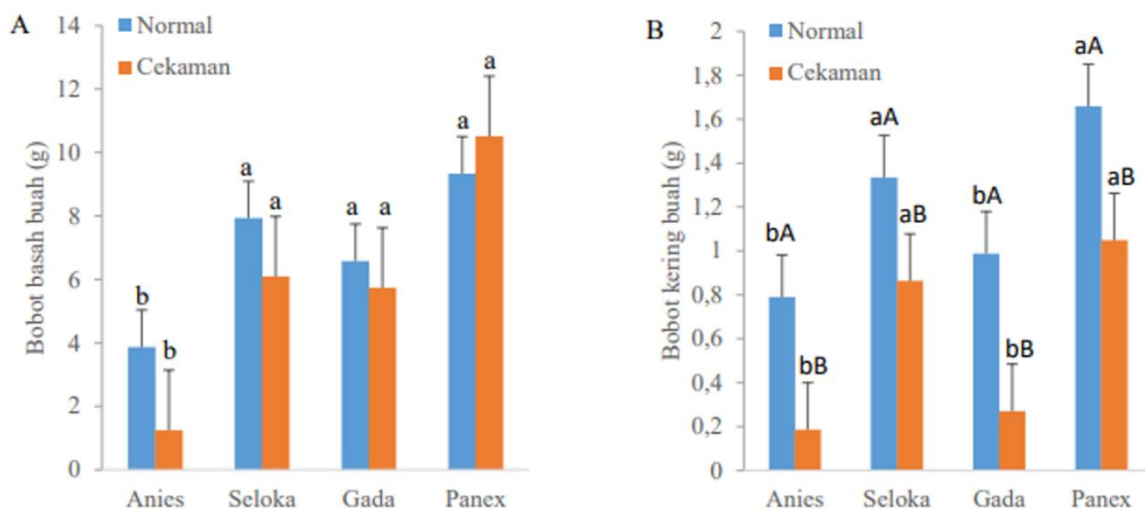
jaringan, termasuk jaringan spons. Selain itu, cekaman kekeringan juga menyebabkan berkurangnya luas daun, terjadinya pengguguran daun, gugurnya bunga, serta perubahan permeabilitas kutikula (Sopandie, 2014). Pada tingkat molekuler, protein saluran air yang dikenal sebagai aquaporin (AQPs) berperan penting dalam pengaturan status air tanaman, yang mencakup proses perkecambahan biji, pemanjangan sel, dinamika hidrolik daun, dan konduktansi stomata (Sahitya et al., 2019).

Hasil berbagai penelitian menunjukkan bahwa cekaman kekeringan pada tanaman cabai merah menimbulkan perubahan yang signifikan terhadap karakter fenologi, morfologi, dan hasil, antara lain waktu pembungaan, jumlah cabang, tinggi tanaman, jumlah buah per tanaman, bobot dan ukuran buah, diameter buah, jumlah biji per buah, bobot biomassa, serta kandungan metabolit seperti prolin dan capsanthin (Yusniwati et al., 2008; Tian et al., 2014; Khan et al., 2020). Selain memengaruhi aspek morfologi dan fisiologi, kondisi kekeringan juga berdampak pada perubahan anatomi tanaman. Studi pada tanaman kedelai melaporkan adanya pelebaran korteks akar, peningkatan rasio lebar jaringan floem dan xilem, penurunan sklerenkima intravaskular, peningkatan luas sel epidermis, pelebaran jaringan palisade, pengurangan jaringan parenkim spons, serta penurunan ukuran stomata pada tanaman yang mengalami cekaman kekeringan (Makbul et al., 2011).

Hasil penelitian Airlangga, *et al.* (2023) menunjukkan bahwa pada kondisi cekaman kekeringan, pertumbuhan vegetatif dan generatif tanaman cabai secara umum terhambat. Gambar perbandingan tinggi tanaman cabai, bobot basah buah dan bobot kering buah cabai pada kondisi normal dan cekaman kekeringan ditampilkan sebagai berikut:



Gambar 1. Pertumbuhan tinggi tanaman pada percobaan tahap 1 kondisi normal (A) dan tercekam kering (B), MST = minggu setelah tanam. (Airlangga *et al.*, 2023)



Gambar 2. Bobot basah buah (A) dan bobot kering buah (B) pada umur 11 MST pada setiap varietas (Sumber : (Airlangga *et al.*, 2023))

Keterangan: Batang yang diikuti huruf kecil yang sama menunjukkan nilai yang tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5% terhadap varietas. Batang yang diikuti huruf besar yang sama menunjukkan nilai yang tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5% terhadap perlakuan cekaman (Airlangga *et al.*, 2023).

Cekaman kekeringan memicu stres oksidatif yang ditandai dengan peningkatan produksi *reactive oxygen species* (ROS). Untuk mempertahankan homeostasis sel, tanaman mengembangkan mekanisme adaptasi melalui peningkatan sistem antioksidan dan akumulasi senyawa osmoregulator, seperti prolin, yang berperan dalam menjaga tekanan osmotik sel dan stabilitas membran (Apel & Hirt, 2004; Mittler *et al.*, 2004; Rini *et al.*, 2020).

Cekaman kekeringan dapat meningkatkan produksi hidrogen peroksida (H_2O_2) pada tanaman sebagai respons terhadap keterbatasan air. Senyawa ini merupakan bagian dari *reactive oxygen species* (ROS) yang terbentuk sebagai hasil samping proses metabolisme sel, terutama pada kondisi stres oksidatif. Kekeringan memicu stres oksidatif yang menyebabkan meningkatnya pembentukan ROS, termasuk oksigen singlet, radikal superoksida, dan H_2O_2 (Impa *et al.*, 2012). Meskipun bersifat reaktif, H_2O_2 relatif stabil dan memiliki daya difusi tinggi, sehingga sering berperan sebagai molekul sinyal penting dalam mekanisme respons tanaman terhadap berbagai cekaman. Peningkatan kadar H_2O_2 dapat menginduksi sistem pertahanan antioksidan atau, pada tingkat stres yang lebih berat, memicu kematian sel (Sihotang *et al.*, 2024).

Pada fase generatif, cekaman kekeringan berdampak lebih lanjut terhadap penurunan produktivitas tanaman cabai, yang ditunjukkan oleh keterlambatan pembungaan, meningkatnya gugur bunga dan buah, berkurangnya jumlah buah per tanaman, serta penurunan ukuran dan bobot buah. Dampak tersebut pada akhirnya menurunkan hasil dan kualitas produksi cabai secara keseluruhan. Perubahan morfologi dan fisiologi ini merupakan bagian dari strategi adaptasi tanaman terhadap kondisi defisit air yang melibatkan mekanisme *drought avoidance* dan *drought tolerance* (Rini *et al.*, 2020).

Tabel 1. Kandungan prolin, gula total, dan klorofil total pada berbagai varietas cabai merah pada tingkat cekaman kekeringan yang berbeda pada 8 MST

Parameter	Tingkat cekaman kekeringan	Lado	Kastilo	BCA	Tanamo	Laris	Romario	Ferosa	Azimuth
Prolin ($mm\ g^{-1}$)	100% KL	0,26	0,20	0,19	0,25	0,20	0,15	0,13	0,29
	75% KL	0,11	0,24	0,32	0,27	0,16	0,16	0,36	0,13
	50% KL	0,10	0,36	0,36	0,27	0,21	0,12	1,08	0,21
Gula total ($mg\ g^{-1}$)	100% KL	42,17	45,47	41,79	50,00	32,92	35,28	36,04	46,51
	75% KL	27,14	27,27	21,69	33,77	49,16	25,65	39,87	37,60
	50% KL	11,36	20,91	20,82	23,55	18,36	20,45	38,27	28,91
Klorofil total ($cm^2\ ml^{-1}$)	100% KL	56,04	49,46	56,04	56,09	45,38	58,41	65,61	41,90
	75% KL	43,86	46,65	54,62	52,19	64,04	59,02	51,10	53,73
	50% KL	44,93	46,55	53,29	53,35	62,15	44,28	56,67	60,83

(Ichwan *et al.*, 2017).

Hasil penelitian Ichwan *et al.* (2017) yang ditampilkan pada Tabel 1. menunjukkan bahwa pada kondisi cekaman kekeringan, yang dalam eksperimennya didesain dengan menurunkan taraf kapasitas lapangan secara umum pada hampir seluruh varietas cabai akan menurunkan kandungan gula total. Demikian halnya untuk kandungan klorofil juga menurun pada tanaman cabai yang mengalami cekaman kekeringan. Mekanisme tanaman cabai yang toleran terhadap kekeringan terlihat dengan meningkatnya prolin dan menjaga kandungan gula total dan klorofil.

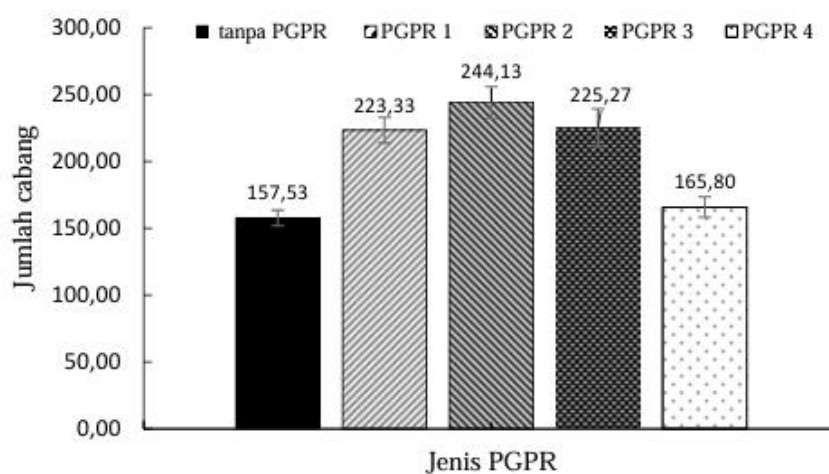
3. Mekanisme PGPR dalam Meningkatkan Toleransi Kekeringan

PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) merupakan kelompok bakteri yang berasosiasi dengan daerah perakaran tanaman dan berperan dalam mendukung pertumbuhan serta perkembangan tanaman secara optimal. Bakteri ini memanfaatkan eksudat akar sebagai sumber nutrisi utama. Namun, dalam kondisi tanpa keberadaan tanaman inang, PGPR tetap mampu bertahan hidup dengan menggunakan bahan organik alami yang tersedia di dalam tanah. Selain berperan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, PGPR juga berfungsi secara tidak langsung sebagai agen pengendali hayati terhadap patogen. Mekanisme tersebut terjadi melalui stimulasi simbiosis mutualistik serta kemampuan PGPR dalam mendegradasi senyawa xenobiotik atau zat berbahaya lain pada tanah yang mengalami pencemaran (Arta *et al.*, 2019).

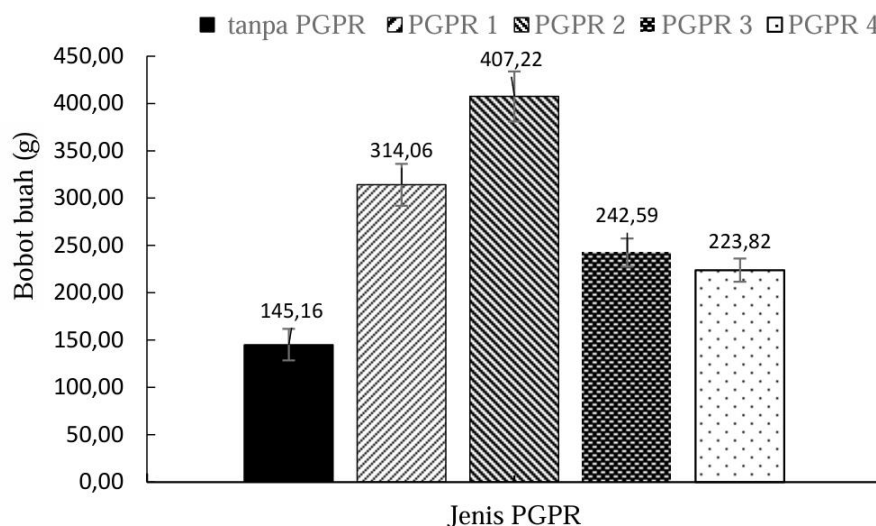
Ollo *et al.* (2019) melaporkan bahwa aplikasi PGPR pada konsentrasi tertentu mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui produksi fitohormon, peningkatan ketersediaan unsur hara, percepatan pembelahan dan perkembangan sel, serta stimulasi proses pembungaan dan pemasakan buah. Sejalan dengan hal tersebut, Ningrum *et al.* (2017) menyatakan bahwa PGPR berperan dalam penyediaan unsur hara esensial seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), sulfur (S), serta ion besi (Fe). Ketersediaan hara dan air yang optimal, didukung oleh sistem perakaran yang berkembang dengan baik, berkontribusi terhadap peningkatan laju fotosintesis tanaman.

Plant Growth Promoting Rhizobacteria adalah bakteri tanah yang hidup di sekitar atau pada permukaan akar dan secara langsung atau tidak langsung mendorong pertumbuhan dan perkembangan tanaman melalui produksi dan sekresi berbagai bahan kimia pengatur di sekitar rhizosfer (Ahemad dan Kilbert, 2013). Pemberian PGPR ke dalam tanah menurut Gupta *et al.* (2015) dapat meningkatkan kesuburan tanah, mendorong pertumbuhan tanaman dan menekan fitopatogen.

Penelitian Ichwan *et al.* (2021) mengaplikasikan beberapa jenis PGPR yang dapat diperoleh secara komersial. PGPR yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah PGPR1 (mengandung *Trichoderma* sp., *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., 11 unsur makro dan mikro essential, serta asam aminoalami); PGPR2 (mengandung *Pseudomonas fluorescent*, *Trichoderma* sp., *Aspergillus niger*, *Azobacter* sp., *Azospirillum* sp., dan *Rhizobium* sp.); PGPR3 (mengandung *Trichoderma* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Rhizobium* sp.); dan PGPR4 (mengandung *Azobakteria* sp, *Aspergillus niger*, dan *Trichoderma harzianum*).



Gambar 3. Jumlah cabang tanaman cabai merah pada umur 15 MST. Error bars menunjukkan standar error (SE) dengan (n = 5) (Ichwan *et al.*, 2021).



Gambar 4. Bobot buah tanaman cabai merah dengan perlakuan berbagai jenis PGPR pada 15 MST. Error bars menunjukkan standar error (n=5) (Ichwan *et al.*, 2021).

Hasil penelitian Ichwan *et al.*, 2021 menunjukkan bahwa aplikasi PGPR meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan generatif dari tanaman cabai. Pertumbuhan vegetatif terlihat dari jumlah cabang yang tanaman cabai yang lebih banyak dengan adanya pemberian PGPR. Demikian pula produksi buah dengan parameter bobot buah dari tanaman cabai yang

lebih tinggi dengan pemberian PGPR dibandingkan tanpa pemberian PGPR. Penelitian tersebut menggunakan berbagai jenis PGPR yang dijual secara komersial. Dan hasil penelitian menunjukkan jenis PGPR yang terbaik adalah PGPR 2 yaitu yang mengandung *Pseudomonas fluorescent*, *Trichoderma* sp., *Aspergillus niger*, *Azobacter* sp., *Azospirillum* sp., dan *Rhizobium* sp.

Keberadaan bakteri *Pseudomonas* sp. yang memiliki kemampuan memproduksi enzim ACC-deaminase berperan dalam menekan akumulasi etilen pada akar, sehingga meningkatkan kemampuan tanaman untuk bertahan pada kondisi cekaman lingkungan (Etesami & Maheswari, 2018). Selanjutnya, Niu *et al.* (2018) melaporkan bahwa *Pseudomonas fluorescens*, *Enterobacter hormaechei*, dan *Pseudomonas migulae* mampu mensintesis eksopolisakarida (EPS) yang berperan dalam meningkatkan perkecambahan bibit millet pada kondisi cekaman kekeringan.

Mekanisme PGPR dalam memodulasi respon fisiologis dan biokimia tanaman cabai (*Capsicum annuum* L.) terhadap cekaman kekeringan dapat melibatkan perubahan fisik, kimia, dan biologi pada tanaman inang yang dalam hal ini adalah tanaman cabai. PGPR memitigasi efek negatif cekaman kekeringan melalui interaksi kompleks yang dikenal sebagai *Induced Systemic Toleranced (IST)*. Mekanisme tersebut meliputi modulasi hormonal yaitu IAA dan ACC Deaminase, penyesuaian osmotik dan akumulasi osmoprotektan, penguatan sistem pertahanan antioksidan, dan produksi eksopolisakarida (EPS) dan biofilm.

Salah satu peran utama PGPR adalah mengatur profil hormon tanaman saat terjadi stres. Bakteri seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas* menyintesis IAA yang memicu pemanjangan sel dan pembentukan akar lateral. Pada kondisi kering, sistem perakaran yang lebih luas memungkinkan cabai menjangkau sumber air di lapisan tanah yang lebih dalam.

Pada kondisi cekaman kekeringan, tanaman cabai memproduksi etilen secara berlebih yang memicu kelayuan. PGPR yang menghasilkan enzim ACC deaminase akan memecah prekursor etilen (ACC) menjadi amonia dan α -ketobutirat, sehingga kadar etilen akibat kondisi stress dapat menurun dan tanaman tetap dapat tumbuh meskipun dalam kondisi kekurangan air.

Menurut Glick (2014) Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) berperan penting dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman kekeringan melalui berbagai mekanisme fisiologis, biokimia, dan molekuler. Salah satu mekanisme utama adalah produksi enzim ACC-deaminase yang menurunkan kadar etilen stres pada tanaman, sehingga mampu mempertahankan pertumbuhan akar dan tajuk pada kondisi kekurangan air. Penurunan etilen ini mencegah penghambatan pertumbuhan yang umumnya terjadi pada tanaman tercekam kekeringan.

Untuk menjaga tekanan turgor sel tetap stabil, PGPR memicu tanaman cabai untuk melakukan penyesuaian osmotik. PGPR menginduksi ekspresi gen yang bertanggung jawab atas biosintesis prolin. Prolin berfungsi sebagai osmoprotektan yang menstabilkan struktur protein dan membran sel. Selain itu, terjadi peningkatan kadar gula terlarut yang membantu tanaman menjaga potensi air sel sehingga tetap lebih rendah dari potensi air tanah, yang memfasilitasi penyerapan air secara pasif.

Selain itu, PGPR mampu meningkatkan ketersediaan dan penyerapan hara melalui fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, serta produksi siderofor yang meningkatkan ketersediaan Fe. Perbaikan status hara ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi fotosintesis dan metabolisme tanaman di bawah kondisi defisit air. PGPR juga menghasilkan fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang merangsang perkembangan sistem perakaran, sehingga meningkatkan kapasitas tanaman dalam menyerap air dari tanah yang kering (Glick, 2014)

Cho *et al.* (2008) melaporkan bahwa kolonisasi akar oleh rizobakteri *Pseudomonas chlororaphis* O6 dapat menginduksi toleransi terhadap cekaman kekeringan. Toleransi yang diinduksi oleh bakteri tersebut berkorelasi dengan berkurangnya kehilangan air akibat meningkatnya persentase penutupan stomata.

Mekanisme berikutnya adalah dengan penguatan sistem pertahanan antioksidan. Kekeringan memicu peningkatan *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang bersifat toksik. PGPR meningkatkan aktivitas enzim antioksidan tanaman cabai untuk menetralkan ROS. Inokulasi PGPR akan meningkatkan aktivitas enzim-enzim ini, sehingga meminimalkan peroksidasi lipid pada membran sel. Hal ini ditandai dengan penurunan kadar Malondialdehida/MDA.

Mekanisme PGPR dalam memitigasi efek negatif cekaman kekeringan selanjutnya dengan produksi eksopolisakarida (EPS) dan biofilm. Beberapa jenis bakteri akan mensekresikan lendir atau EPS yang membantu menciptakan mikro-lingkungan yang lembap di sekitar perakaran (*rhizosphere*). EPS meningkatkan agregasi tanah dan memperbaiki porositas, sehingga meningkatkan kapasitas ikat air (*water holding capacity*) di sekitar akar tanaman cabai.

Kohler *et al.* (2008) juga menunjukkan bahwa inokulasi PGPR *P. mendocina*, baik secara tunggal maupun dikombinasikan dengan fungi mikoriza arbuskula (*Glomus intraradices* atau *G. mosseae*), pada tanaman selada (*Lactuca sativa* L. cv. Tafalla) mampu meningkatkan ketahanan terhadap cekaman kekeringan. Inokulasi tersebut merangsang aktivitas enzim nitrat reduktase dan fosfatase pada akar, serta meningkatkan akumulasi prolin pada daun secara signifikan. Aktivitas total peroksidase dan katalase juga meningkat sebagai respons terhadap cekaman kekeringan. Hasil penelitian ini mendukung potensi penggunaan PGPR sebagai inokulan untuk mengurangi kerusakan oksidatif yang ditimbulkan oleh cekaman kekurangan air.

4. Prospek Masa Depan

Pengaruh aplikasi PGPR dan manfaatnya pada berbagai jenis tanaman termasuk tanaman cabai masih terus diteliti, baik menggunakan strain rizobakteri yang sudah dikenal maupun isolat-isolat lokal yang diperoleh atau diisolasi dari lingkungan tanah setempat (*indigenous*). Diharapkan dengan hasil-hasil penelitian pemberian PGPR untuk memodulasi respon fisiologi dan biokimia tanaman cabai pada kondisi cekaman kekeringan akan memberikan banyak pengetahuan baru sehingga dapat diaplikasikan oleh petani dan memberikan hasil yang signifikan dalam menjawab tantangan iklim.

Saat ini, beberapa produk PGPR sudah dikomersialkan. Di Indonesia, berbagai kelompok bakteri yang tergolong PGPR banyak ditemukan sebagai komponen dalam beragam produk pupuk hayati majemuk komersial, yaitu pupuk hayati yang mengandung lebih dari satu jenis atau strain mikroorganisme. Kelompok bakteri tersebut antara lain bakteri pemfiksasi nitrogen bebas dan bakteri pelarut fosfat yang juga memiliki kemampuan menghasilkan hormon pemacu pertumbuhan tanaman.

Keragaman kondisi lingkungan, yang mencakup keragaman jenis tanah, tingkat pengelolaan lahan, iklim, serta jenis tanaman yang dibudidayakan, disertai dengan durasi pengujian lapangan yang relatif singkat dan metode aplikasi yang belum sepenuhnya optimal, masih menjadi tantangan utama yang memerlukan kajian lebih lanjut guna meningkatkan efektivitas pemanfaatan PGPR di masa mendatang.

Keberhasilan PGPR untuk tanaman cabai juga dipengaruhi oleh metode aplikasinya. Ada beberapa metode untuk mengintroduksi PGPR ke tanaman, di antaranya dengan perlakuan benih, penyiraman di tanah, dan penggunaan carrier atau pembawa. Perlakuan benih dilakukan dengan melapisi benih dengan biostimulan sebelum tanam. Ini efektif untuk memastikan kolonisasi dini sejak perkecambahan. Selanjutnya dengan cara disiramkan di tanah sekitar perakaran. Larutan bakteri disiramkan ke sekitar perakaran. Metode ini memungkinkan populasi bakteri yang lebih tinggi menjangkau zona perakaran aktif. Aplikasi dengan *carrier* yaitu penggunaan bahan organik seperti gambut, kompos, atau biochar sebagai pembawa bakteri membantu meningkatkan daya simpan dan kelangsungan hidup bakteri sebelum mencapai akar.

Tantangan ke depan dalam mengaplikasikan PGPR pada pertanaman cabai dalam kondisi kekeringan antara lain adalah adanya interaksi dengan mikroba lokal, konsistensi hasil di pertanian secara praktis, masa simpan dari PGPR itu sendiri, serta adaptasi dan edukasi ke petani. Tantangan persaingan antara PGPR yang diintroduksi dengan mikroba asli tanah yang sudah beradaptasi lebih dulu atau mikroba lokal. Selain itu PGPR sebagai produk hayati performanya sering mengalami fluktuasi karena berbagai faktor lingkungan. Selain itu, sangat diperlukan edukasi untuk mengubah paradigma pertanian yang mengedepankan keberlanjutan dengan penelitian, pengembangan, dan pemanfaatan PGPR.

5. Kesimpulan

Kondisi lingkungan abiotik berupa cekaman kekeringan akan secara langsung mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan dari tanaman cabai. *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) memodulasi respon baik itu secara fisiologis maupun secara biokimia dari tanaman cabai terhadap kondisi cekaman kekeringan itu melalui berbagai mekanisme. PGPR berpotensi untuk dikembangkan sebagai inovasi dalam meningkatkan toleransi tanaman cabai pada kondisi cekaman kekeringan sehingga dapat mempertahankan produktivitasnya. Penelitian lanjutan dan pengujian PGPR diperlukan untuk mendapatkan hasil yang optimal untuk pengaplikasian PGPR yang lebih luas.

Daftar Pustaka

- Ahemad, M., and M. Kilbret. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current Perspective. *Journal of King Saud University Science (Review)*, 26: 1- 20.
- Airlangga, R. P., Sudarsono, dan S. Amarillis. (2023). Pengaruh Cekaman Kering terhadap Respon Pertumbuhan Cabai Merah pada Fase Vegetatif. *Bul. Agrohorti*, 11(2): 297-306.
- Apel, K. and Hirt, H., (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, pp. 373–399. doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701
- Arta, B. P., Noor, G. M. S., & Makalew, A. M. (2019). Respon Cabai Rawit Varietas Hiyung (*Capsicum frutescens* L.) Terhadap Konsentrasi PGR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) Pada Ultisol Di Kabupaten Tanah Laut. *Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa*, 2(1): 1-8.
- BPS. 2023. Produksi Tanaman Sayuran (2023). <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NjEjMg==/production-of-vegetables.html>
- Cho S. M., Kang B. R, Han S.H., Anderson A. J., Park J. Y., Lee Y. H., Cho B. H. , Yang K. Y., Ryu C. M., Kim Y. C. (2008) 2R, 3R-Butanediol, a bacterial volatile produced by *Pseudomonas chlororaphis* 06, is involved in induction of systemic tolerance to drought in *Arabidopsis thaliana*. *Mol Plant Microbe Interact* 21(8):1067-1075
- Etesami, H., and D.K.Maheshwari. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promotion traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospect. *Exotoxicology and Environment Safety* 156:225-246.
- Firdaus, M. (2021). Disparitas harga pangan strategis sebelum dan saat pandemi Covid-19. *Jurnal Ekonomi Indonesia*, 10(2), 107-120.
- Glick, B. R. (2014) Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research* 169 (2014) 30– 39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>
- Gupta, G., S.S. Parihar, N.K. Ahirwar, S.K. Snehi, and V. Singh. 2015. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospect for development of sustainable agriculture. *Microb Biochem Technol* 7(2): 96-102.
- Ichwan, B., T. Novita, Eliyanti, dan E. Masita. (2021). Aplikasi Berbagai Jenis Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Hasil Cabai Merah (*Capsicum annum* L.). *Jurnal Media Pertanian*, 6(1) April 2021, pp.1-7
- Ichwan, B., R. A. Suwignyo, R. Hayati, and Susilawati. (2017). Response Of Red Chilli Varieties Under Drought Stress. *RJOAS*, 6(66), June 2017. DOI <https://doi.org/10.18551/rjoas.2017-06.43>
- Impa, S. M., S. Nadaradjan, and S. V. K. Jagadish, “Drought stress induced reactive oxygen species and anti-oxidants in plants,” *Abiotic Stress responses plants Metab. Product. Sustain.*, pp. 131–147, 2012
- Kohler A, Hernández JA, Caravaca F, Roldán A (2008) Plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi modify alleviation biochemical mechanisms in water-stressed plant. *Funct Plant Biol* 35(2):141-151
- Miller, G., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S. and Mittler, R., (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant, Cell & Environment*, 33(4), pp. 453–467. doi: 10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x.
- Niu, X., L. Song, Y. Xiao, and W. Ge. (2018). Drought-tolerant plant growth-promotingrhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. *Frontiers in Microbiology* vol.8, article 2580.
- Ningrum, L. P., Salim, N., & Balqis, U. (2017). Pengaruh Ekstrak Daun Jamblang (*Syzygium cumini* L) Terhadap Histopatologi Hepar Tikus Putih (*Rattus norvegicus*. *Jimvet*, 1(4): 695–701.
- Ollo, N., Rizal, F., & Nadya, M. (2019). Pemberian dan Konsentrasi PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) Terhadap Produksi dan Mutu Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L.). *Agriprima: Journal of Agricultural Scienses*, 1(2), 174-184.
- Rahni, N. M. 2012. Efek Fitohormon PGPR Terhadap Pertumbuhan Tanaman Jagung. Kendari: Universitas Haluoleo Press.
- Rini, D. S., Budiarto, I. Gunawan, R. H. Agung, dan R. Munazar. (2020). Mekanisme Respon Tanaman terhadap Cekaman Kekeringan. *Berita Biologi Jurnal Ilmu Ilmu Hayati*:373-384.
- Sahitya, U. L., M. S. R. Krishna, P. Suneetha. (2019). Integrated approaches to study the drought tolerance mechanism in hot pepper (*Capsicum annum* L.). *Physiol Mol Biol Plants*. 25(3):637–647. doi:10.1007/s12298-019-00655-7.

- Sihotang, T., Siregar, L. A. M., & Rahmawati, N. (2024). Growth and biochemical responses of red chili (*Capsicum annuum* L) under drought conditions with 6-Benzylaminopurine application. *International Journal of Basic and Applied Science*, 13(2), 61–73. <https://doi.org/10.35335/ijobas.v13i2.404>
- Sopandie, D. (2014). Fisiologi Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Abiotik pada Agroekosistem Tropika. Ed ke-1. Bogor: IPB Press.
- Utomo. (2002). Pengelolaan lahan kering untuk pertanian berkelanjutan. Seminar Nasional IV pengembangan wilayah lahan kering dan pertemuan ilmiah tahunan himpunan ilmu tanah Indonesia di Mataram, 27-28 Mei 2002.