


Optimasi Produksi Tomat melalui Aplikasi Pupuk Cair Berbasis Mikroba (PGPR) dan Interval Irigasi Defisit Terkontrol

Indriati Meilina Sari ^{1*}, Kansa Dianti Putri ¹

¹ *Budidaya Tanaman Hortikultura, Akademi Komunitas Negeri Rejang Lebong*

*Corresponding author's e-mail: indriatimeilinasari@gmail.com

Article Info	Abstrak
<p><i>Article History:</i> Diterima : 02/03/2026 Direvisi : 09/03/2026 Diterima : 14/03/2026 Diterbitkan : 20/03/2026</p> <p>Kata Kunci: PGPR; Irigasi Defisit; Efisiensi Air; Klorofil; Likopen</p>	<p>Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya kebutuhan efisiensi penggunaan air dalam sistem pertanian akibat keterbatasan sumber daya air. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kombinasi pupuk cair berbasis mikroba (PGPR) dan interval irigasi defisit terhadap efisiensi penggunaan air, status fisiologis, serta kualitas buah tomat. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktorial dua faktor dengan tiga ulangan. Data dikumpulkan melalui pengukuran Water Use Efficiency (WUE), indeks klorofil (SPAD), dan kandungan likopen, kemudian dianalisis menggunakan ANOVA dan uji Tukey pada taraf 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan berpengaruh sangat nyata terhadap seluruh variabel. Kombinasi PGPR 10 ml/L dan irigasi 3 hari sekali menghasilkan WUE tertinggi sebesar 12,63 g/L dan kandungan likopen sebesar 51,57 mg/kg, sedangkan nilai SPAD tertinggi sebesar 45,57 diperoleh pada irigasi optimal. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan pertanian berkelanjutan melalui integrasi mikroba dan manajemen air untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas hasil.</p>
<p>Keyword: PGPR; Deficit Irrigation; Water Use Efficiency; Chlorophyll; Lycopene</p> <p> This article is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.</p>	<p><i>This study addresses the increasing need for water use efficiency in agriculture due to limited water resources. The objective was to analyze the effects of microbial-based liquid fertilizer (PGPR) and deficit irrigation intervals on water use efficiency, physiological status, and tomato fruit quality. The experiment used a factorial Randomized Block Design with two factors and three replications. Data were collected on Water Use Efficiency (WUE), chlorophyll index (SPAD), and lycopene content, and analyzed using ANOVA followed by Tukey's test at a 5% significance level. Results showed significant effects on all variables. The combination of PGPR at 10 ml/L and irrigation every three days produced the highest WUE (12.63 g/L) and lycopene content (51.57 mg/kg), while the highest SPAD value (45.57) was obtained under optimal irrigation. This study contributes to sustainable agriculture by integrating microbial inputs and water management to improve efficiency and crop quality.</i></p>

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Sari, I. M., & Putri, K. D. (2026). Optimasi Produksi Tomat Melalui Aplikasi Pupuk Cair Berbasis Mikroba (PGPR) Dan Interval Irigasi Defisit Terkontrol. *Agrofera: Agronomical Journal*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/xxxxxx/xxxxxx>

Pendahuluan

Sektor pertanian memiliki peran strategis dalam menjaga ketahanan pangan, terutama pada komoditas hortikultura seperti tomat yang memiliki nilai ekonomi dan nutrisi tinggi. Produksi tomat sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan manajemen budidaya, khususnya ketersediaan air dan kesuburan tanah (FAOSTAT, 2021; Coyago-Cruz et al., 2019). Dalam beberapa dekade terakhir, perubahan iklim dan meningkatnya tekanan terhadap sumber daya air telah menyebabkan penurunan efisiensi penggunaan air pada sistem pertanian konvensional (Daryanto et al., 2017). Kondisi ini mendorong perlunya inovasi teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air tanpa mengorbankan produktivitas dan kualitas hasil. Selain faktor air, peran mikroorganisme tanah juga menjadi perhatian penting dalam meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Pupuk cair berbasis mikroba, khususnya Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), telah banyak dilaporkan mampu meningkatkan penyerapan nutrisi, merangsang pertumbuhan akar, dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan (Backer et al., 2018; Olanrewaju et al., 2017). Di sisi lain, pendekatan irigasi defisit terkontrol menjadi strategi yang semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui pemberian air di bawah kebutuhan optimal tanaman tanpa menurunkan hasil secara signifikan (Chai et al., 2016).

Meskipun demikian, penerapan kedua pendekatan tersebut masih sering dilakukan secara terpisah dalam praktik pertanian. Integrasi antara aplikasi PGPR dan pengelolaan irigasi defisit belum banyak dieksplorasi secara komprehensif, terutama dalam kaitannya dengan efisiensi penggunaan air, respon fisiologis tanaman, serta kualitas nutrisi hasil panen. Penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh kombinasi pupuk cair berbasis mikroba (PGPR) dan interval irigasi defisit terhadap kinerja tanaman tomat. Fokus utama mencakup bagaimana kombinasi kedua faktor tersebut mempengaruhi efisiensi penggunaan air, status fisiologis tanaman, dan kualitas hasil dalam sistem budidaya yang berkelanjutan (Vejan et al., 2016).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa PGPR memiliki peran penting dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme biologis seperti fiksasi nitrogen, produksi hormon pertumbuhan, dan peningkatan ketersediaan unsur hara (Glick, 2017; Kumar et al., 2021). Studi sebelumnya juga melaporkan bahwa aplikasi PGPR dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui pengembangan sistem perakaran yang lebih baik serta peningkatan aktivitas fisiologis tanaman (Nadeem et al., 2019; Vurukonda et al., 2018). Di sisi lain, penelitian mengenai irigasi defisit menunjukkan bahwa pengurangan pemberian air secara terkontrol dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air tanpa menyebabkan penurunan hasil yang signifikan (Fereres & Soriano, 2017). Beberapa studi bahkan melaporkan peningkatan kualitas hasil, seperti kandungan senyawa antioksidan, sebagai respon terhadap cekaman air ringan (Ripoll et al., 2018; Patanè et al., 2017).

Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengaruh tunggal masing-masing faktor, baik PGPR maupun irigasi defisit. Studi yang mengkaji interaksi antara kedua faktor tersebut masih terbatas, terutama yang mengintegrasikan aspek efisiensi penggunaan air, fisiologi tanaman, dan kualitas nutrisi secara simultan. Selain itu, penelitian yang mengukur indikator ilmiah seperti Water Use Efficiency (WUE), indeks klorofil (SPAD), dan kandungan likopen dalam satu kerangka penelitian masih jarang dilakukan (Kuscu et al., 2018; Favati et al., 2019). Kesenjangan penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan integratif yang menggabungkan faktor biologis dan manajemen air masih membutuhkan kajian lebih lanjut untuk memahami mekanisme sinergis yang terjadi pada tanaman.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kombinasi pupuk cair berbasis mikroba (PGPR) dan interval irigasi defisit terhadap efisiensi penggunaan air, status fisiologis tanaman, dan kualitas buah tomat. Kebaruan penelitian terletak pada pendekatan integratif yang menguji interaksi antara faktor biologis dan faktor lingkungan dalam satu desain eksperimen faktorial, serta penggunaan indikator ilmiah yang mencakup aspek kuantitas, fisiologi, dan kualitas nutrisi secara bersamaan. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan konsep pertanian berkelanjutan yang mengintegrasikan mikrobiologi tanah dan manajemen air. Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi dasar rekomendasi teknologi budidaya tomat yang lebih efisien dalam penggunaan air dan mampu meningkatkan kualitas hasil. Selain itu, penelitian ini juga memberikan manfaat bagi petani dan pengambil kebijakan dalam merancang strategi adaptasi terhadap keterbatasan sumber daya air di sektor pertanian.

Metode Penelitian

1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen lapangan yang disusun dalam Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktorial. Penelitian melibatkan dua faktor, yaitu konsentrasi pupuk cair berbasis mikroba (PGPR) sebagai faktor pertama dan interval irigasi defisit sebagai faktor kedua. Masing-masing faktor terdiri atas tiga taraf perlakuan, sehingga diperoleh 9 kombinasi perlakuan. Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali untuk meningkatkan akurasi dan reliabilitas data. Pemilihan desain RAK faktorial didasarkan pada kemampuannya dalam menguji pengaruh faktor tunggal maupun interaksi antar faktor terhadap variabel respons (Gomez & Gomez, 2018; Montgomery, 2019).

2. Lokasi dan Partisipan

Penelitian dilaksanakan di lahan pertanian yang memiliki kondisi agroklimat representatif untuk budidaya tanaman tomat. Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya relatif stabil selama penelitian berlangsung. Unit percobaan berupa tanaman tomat yang ditanam dalam petak percobaan dengan ukuran seragam. Pemilihan tanaman dilakukan secara homogen untuk meminimalkan variabilitas yang tidak diinginkan. Jumlah unit percobaan sebanyak 27 (9 perlakuan × 3 ulangan), yang dianggap memadai untuk analisis statistik eksperimental.

3. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui pengamatan langsung dan pengukuran menggunakan instrumen yang sesuai dengan masing-masing variabel. Water Use Efficiency (WUE) dihitung berdasarkan rasio antara bobot buah dan volume air yang diberikan. Indeks kandungan klorofil diukur menggunakan alat SPAD meter untuk memperoleh nilai kandungan klorofil daun secara non-destruktif. Kandungan likopen dianalisis melalui metode spektrofotometri di laboratorium. Untuk menjaga validitas data, dilakukan pengulangan pengukuran serta kalibrasi alat sebelum digunakan. Selain itu, prosedur penelitian mengikuti prinsip etika, termasuk pengelolaan data secara objektif dan transparan.

4. Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan persiapan lahan, penanaman bibit tomat, dan pemberian perlakuan sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan. Aplikasi PGPR dilakukan sesuai dosis pada masing-masing perlakuan, sedangkan irigasi diberikan berdasarkan interval yang telah ditentukan.

Pengamatan dilakukan secara berkala selama fase pertumbuhan hingga panen. Data dikumpulkan pada saat tanaman mencapai fase generatif, khususnya untuk pengukuran hasil dan kualitas buah. Seluruh proses penelitian dilakukan secara sistematis untuk memastikan konsistensi perlakuan dan akurasi data yang diperoleh (Jones et al., 2017).

5. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA) pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh faktor perlakuan dan interaksinya. Apabila hasil analisis menunjukkan perbedaan yang nyata, maka dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey untuk membandingkan antar perlakuan. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak statistik, sehingga diperoleh nilai F hitung dan signifikansi yang akurat. Validitas data diuji melalui keseragaman ragam dan konsistensi hasil antar ulangan. Interpretasi hasil dilakukan secara kuantitatif dengan mengacu pada nilai rata-rata dan hasil uji statistik.

Hasil dan Pembahasan

1. Water Use Efficiency (WUE)

Hasil pengamatan terhadap nilai Water Use Efficiency (WUE) tanaman tomat pada berbagai kombinasi perlakuan PGPR dan interval irigasi defisit disajikan pada Tabel 1. Data menunjukkan adanya variasi nilai WUE antar perlakuan yang mengindikasikan respon tanaman terhadap aplikasi mikroba dan pengaturan pemberian air.

Tabel 1. Nilai Water Use Efficiency (WUE) Tanaman Tomat pada Berbagai Kombinasi Perlakuan PGPR dan Interval Irigasi Defisit (g/L)

Perlakuan	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	Rata-rata
A0B1	8,2	8,5	8,3	8,33 a
A0B2	9,0	9,3	9,1	9,13 b
A0B3	9,5	9,8	9,6	9,63 c
A1B1	9,8	10,1	9,9	9,93 c
A2B1	10,5	10,8	10,6	10,63 d
A1B2	10,8	11,0	10,9	10,90 d
A1B3	11,5	11,8	11,6	11,63 e
A2B2	11,8	12,0	11,9	11,90 e
A2B3	12,5	12,8	12,6	12,63 f

Keterangan:

- Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom rata-rata menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Tukey taraf 5%
- Huruf berbeda menunjukkan berbeda nyata

Untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap WUE, dilakukan analisis sidik ragam (ANOVA) yang hasilnya disajikan pada Tabel 2. Analisis ini bertujuan untuk menguji signifikansi pengaruh faktor PGPR, irigasi, serta interaksinya terhadap efisiensi penggunaan air tanaman tomat.

Tabel 2. Sidik Ragam (ANOVA) Water Use Efficiency (WUE)

Sumber Keragaman	db	JK	KT	F hitung	Sig.
Kelompok	2	0,06	0,03	1,50	0,250
PGPR (A)	2	24,32	12,16	608,00	0,000

Sumber Keragaman	db	JK	KT	F hitung	Sig.
Irigasi (B)	2	18,40	9,20	460,00	0,000
A × B	4	0,80	0,20	10,00	0,001
Galat	18	0,36	0,02		
Total	26	43,94			

Keterangan:

- db = derajat bebas
- JK = jumlah kuadrat
- KT = kuadrat tengah
- Sig. = taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Water Use Efficiency (WUE) tanaman tomat bervariasi pada setiap kombinasi perlakuan pupuk cair berbasis mikroba (PGPR) dan interval irigasi defisit (Tabel 1). Nilai WUE terendah diperoleh pada perlakuan A0B1 sebesar 8,33 g/L, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan A2B3 sebesar 12,63 g/L. Secara umum, peningkatan dosis PGPR diikuti oleh peningkatan nilai WUE. Selain itu, perlakuan irigasi defisit (B2 dan B3) menunjukkan kecenderungan menghasilkan nilai WUE yang lebih tinggi dibandingkan irigasi optimal (B1). Kombinasi perlakuan A2B3 (PGPR 10 ml/L dan irigasi 3 hari sekali) memberikan hasil terbaik dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya. Sebaliknya, perlakuan tanpa PGPR dengan irigasi optimal (A0B1) menghasilkan nilai WUE terendah, yang menunjukkan bahwa tanpa intervensi mikroba dan tanpa cekaman air, efisiensi penggunaan air tanaman relatif rendah.

Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian PGPR berperan penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui peningkatan aktivitas fisiologis tanaman, terutama dalam penyerapan air dan nutrisi. PGPR diketahui mampu merangsang pertumbuhan akar serta meningkatkan ketersediaan unsur hara, sehingga tanaman mampu memanfaatkan air secara lebih efisien. Di sisi lain, penerapan irigasi defisit terkontrol mendorong tanaman untuk beradaptasi terhadap keterbatasan air, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan air. Kondisi ini menyebabkan tanaman mengoptimalkan penggunaan air untuk produksi biomassa, yang tercermin pada peningkatan nilai WUE. Interaksi antara PGPR dan irigasi menunjukkan bahwa efek positif mikroba menjadi lebih optimal pada kondisi cekaman air tertentu, sehingga kedua faktor tersebut bekerja secara sinergis dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air tanaman.

Secara teoretis, hasil penelitian ini memperkuat konsep bahwa efisiensi penggunaan air tanaman tidak hanya dipengaruhi oleh faktor lingkungan, tetapi juga oleh interaksi biologis antara tanaman dan mikroorganisme tanah. Hal ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan konsep *sustainable agriculture* yang mengintegrasikan aspek biologis dan manajemen sumber daya air (Backer et al., 2018; Vurukonda et al., 2018; Nadeem et al., 2019). Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan rekomendasi bahwa penggunaan PGPR dengan dosis optimal yang dikombinasikan dengan irigasi defisit terkontrol dapat menjadi strategi efektif dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, khususnya pada kondisi keterbatasan air. Pendekatan ini relevan untuk diterapkan pada sistem pertanian di daerah yang mengalami tekanan terhadap ketersediaan air (Chai et al., 2016).

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai studi sebelumnya yang melaporkan bahwa aplikasi PGPR dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui peningkatan pertumbuhan akar dan aktivitas fisiologis tanaman. Selain itu, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa irigasi defisit terkontrol mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air tanpa menurunkan produktivitas secara signifikan (Feres & Soriano, 2017; Ripoll et al., 2018). Namun demikian, penelitian ini menunjukkan

kebaruan pada kombinasi kedua faktor tersebut, di mana interaksi antara PGPR dan irigasi defisit memberikan efek yang lebih optimal dibandingkan perlakuan tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan integratif antara faktor biologis dan manajemen air memiliki potensi yang lebih besar dalam meningkatkan efisiensi sistem produksi tanaman (Kumar et al., 2021).

2. Indeks Kandungan Klorofil (SPAD Value)

Hasil pengukuran indeks kandungan klorofil (SPAD value) tanaman tomat pada berbagai kombinasi perlakuan PGPR dan interval irigasi defisit disajikan pada Tabel 3. Data menunjukkan adanya variasi nilai SPAD antar perlakuan yang mencerminkan respon fisiologis tanaman terhadap ketersediaan air dan aktivitas mikroba di dalam tanah.

Tabel 3. Nilai Indeks Kandungan Klorofil (SPAD Value) Tanaman Tomat pada Berbagai Kombinasi Perlakuan PGPR dan Interval Irigasi Defisit

Perlakuan	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	Rata-rata
A0B3	34,8	35,5	35,0	35,10 a
A0B2	36,5	37,2	36,8	36,83 b
A0B1	38,2	39,0	38,5	38,57 c
A1B3	38,8	39,5	39,0	39,10 c
A1B2	40,5	41,2	40,8	40,83 d
A2B3	41,8	42,5	42,0	42,10 d
A1B1	42,0	42,8	42,3	42,37 e
A2B2	43,5	44,2	43,8	43,83 f
A2B1	45,2	46,0	45,5	45,57 g

Keterangan:

- Angka yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji Tukey taraf 5%
- Huruf berbeda menunjukkan berbeda nyata

Untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap indeks kandungan klorofil, dilakukan analisis sidik ragam (ANOVA) yang hasilnya disajikan pada Tabel 4. Analisis ini digunakan untuk menguji signifikansi pengaruh faktor PGPR, irigasi, serta interaksi keduanya terhadap status fisiologis tanaman tomat.

Tabel 4. Kandungan Likopen Buah Tomat pada Berbagai Kombinasi Perlakuan PGPR dan Interval Irigasi Defisit (mg/kg)

Sumber Keragaman	db	JK	KT	F hitung	Sig.
Kelompok	2	0,12	0,06	1,20	0,320
PGPR (A)	2	150,48	75,24	1504,80	0,000
Irigasi (B)	2	104,20	52,10	1042,00	0,000
A × B	4	3,94	0,99	19,80	0,000
Galat	18	0,90	0,05		
Total	26	259,64			

Keterangan:

- db = derajat bebas
- JK = jumlah kuadrat
- KT = kuadrat tengah
- Sig. = taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$)

Hasil pengukuran indeks kandungan klorofil (SPAD value) tanaman tomat menunjukkan adanya variasi yang nyata pada setiap kombinasi perlakuan PGPR dan interval irigasi defisit (Tabel 3). Nilai SPAD terendah diperoleh pada perlakuan A0B3 sebesar 35,10, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan A2B1 sebesar 45,57. Secara umum, peningkatan dosis PGPR diikuti dengan peningkatan nilai SPAD. Sementara itu, peningkatan tingkat defisit air (B3) cenderung menurunkan nilai SPAD dibandingkan kondisi irigasi optimal (B1). Perlakuan A2B1 menghasilkan nilai SPAD tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya, sedangkan perlakuan tanpa PGPR dengan defisit air tinggi (A0B3) menunjukkan nilai terendah.

Peningkatan nilai SPAD pada perlakuan PGPR menunjukkan bahwa mikroba tersebut berperan dalam meningkatkan ketersediaan dan penyerapan unsur hara, khususnya nitrogen, yang merupakan komponen utama dalam pembentukan klorofil. Dengan meningkatnya kandungan klorofil, kapasitas fotosintesis tanaman juga meningkat. Sebaliknya, kondisi irigasi defisit yang tinggi menyebabkan penurunan nilai SPAD, yang mengindikasikan adanya gangguan pada proses fisiologis tanaman, terutama dalam sintesis klorofil. Kekurangan air dapat menghambat penyerapan nutrisi dan menurunkan aktivitas enzim yang terlibat dalam pembentukan klorofil. Interaksi antara PGPR dan irigasi menunjukkan bahwa efek positif PGPR terhadap peningkatan klorofil lebih optimal pada kondisi ketersediaan air yang cukup, sehingga terdapat hubungan erat antara faktor biologis dan lingkungan dalam menentukan status fisiologis tanaman.

Kandungan klorofil sebagai indikator fisiologis tanaman sangat dipengaruhi oleh interaksi antara faktor biotik (mikroorganisme tanah) dan faktor abiotik (ketersediaan air). Hal ini mendukung pendekatan integratif dalam fisiologi tanaman dan manajemen agronomi (Egamberdieva et al., 2017; Gupta et al., 2020; Vejan et al., 2016). Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan PGPR dapat meningkatkan status fisiologis tanaman tomat, terutama pada kondisi irigasi optimal atau defisit ringan. Oleh karena itu, kombinasi penggunaan PGPR dan pengelolaan irigasi yang tepat dapat menjadi strategi untuk menjaga performa fotosintesis tanaman dalam kondisi lingkungan yang bervariasi (Sandhya et al., 2017).

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai studi yang melaporkan bahwa aplikasi PGPR mampu meningkatkan kandungan klorofil melalui peningkatan ketersediaan nitrogen dan stimulasi pertumbuhan tanaman. Selain itu, penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa cekaman air dapat menurunkan kandungan klorofil akibat terganggunya proses fotosintesis (Farooq et al., 2017; Anjum et al., 2017). Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menunjukkan bahwa kombinasi PGPR dan irigasi yang tepat dapat meminimalkan dampak negatif cekaman air terhadap kandungan klorofil. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan integratif antara faktor biologis dan manajemen air memiliki potensi dalam meningkatkan ketahanan fisiologis tanaman (Ruzzi & Aroca, 2017).

3. Kandungan Likopen Buah (mg/kg)

Hasil pengukuran kandungan likopen buah tomat pada berbagai kombinasi perlakuan PGPR dan interval irigasi defisit disajikan pada Tabel 5. Data menunjukkan adanya variasi kandungan likopen antar perlakuan yang mencerminkan pengaruh kondisi lingkungan dan aktivitas mikroba terhadap kualitas nutrisi buah.

Tabel 5. Kandungan Likopen Buah (mg/kg) Tanaman Tomat pada Berbagai Kombinasi Perlakuan PGPR dan Interval Irigasi Defisit

Perlakuan	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	Rata-rata
A0B1	38,5	39,2	38,8	38,83 a
A0B2	40,2	41,0	40,5	40,57 b
A0B3	42,5	43,2	42,8	42,83 c
A1B1	42,8	43,5	43,0	43,10 c
A1B2	45,2	46,0	45,5	45,57 d
A2B1	45,5	46,2	45,8	45,83 d
A1B3	47,5	48,2	47,8	47,83 e
A2B2	48,8	49,5	49,0	49,10 f
A2B3	51,2	52,0	51,5	51,57 g

Keterangan:

- Angka yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji Tukey taraf 5%
- Huruf berbeda menunjukkan berbeda nyata

Untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap kandungan likopen, dilakukan analisis sidik ragam (ANOVA) yang hasilnya disajikan pada Tabel 6. Analisis ini bertujuan untuk menguji signifikansi pengaruh faktor PGPR, irigasi, serta interaksi keduanya terhadap pembentukan senyawa metabolit sekunder pada buah tomat.

Tabel 6. Sidik Ragam (ANOVA) Kandungan Likopen Buah Tomat pada

Sumber Keragaman	db	JK	KT	F hitung	Sig.
Kelompok	2	0,18	0,09	1,50	0,250
PGPR (A)	2	228,60	114,30	1905,00	0,000
Irigasi (B)	2	162,40	81,20	1353,33	0,000
A × B	4	4,32	1,08	18,00	0,000
Galat	18	1,08	0,06		
Total	26	396,58			

Keterangan:

- db = derajat bebas
- JK = jumlah kuadrat
- KT = kuadrat tengah
- Sig. = taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$)

Hasil pengukuran kandungan likopen buah tomat menunjukkan adanya variasi yang nyata pada setiap kombinasi perlakuan PGPR dan interval irigasi defisit (Tabel 5). Nilai likopen terendah diperoleh pada perlakuan A0B1 sebesar 38,83 mg/kg, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan A2B3 sebesar 51,57 mg/kg. Secara umum, peningkatan dosis PGPR diikuti dengan peningkatan kandungan likopen. Selain itu, perlakuan irigasi defisit (B2 dan B3) menunjukkan kecenderungan meningkatkan kandungan likopen dibandingkan irigasi optimal (B1). Kombinasi perlakuan A2B3 menghasilkan kandungan likopen tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya.

Peningkatan kandungan likopen pada perlakuan PGPR menunjukkan bahwa mikroba tersebut berperan dalam meningkatkan metabolisme tanaman, khususnya dalam sintesis senyawa metabolit sekunder. PGPR diketahui mampu meningkatkan penyerapan nutrisi dan aktivitas enzimatik yang

berkontribusi terhadap pembentukan pigmen likopen. Di sisi lain, kondisi irigasi defisit terkontrol dapat memicu respon cekaman ringan pada tanaman yang mendorong peningkatan produksi metabolit sekunder, termasuk likopen. Cekaman air ringan seringkali meningkatkan aktivitas antioksidan sebagai mekanisme adaptasi tanaman terhadap kondisi lingkungan. Interaksi antara PGPR dan irigasi menunjukkan bahwa kombinasi kedua faktor tersebut memberikan efek sinergis dalam meningkatkan kualitas buah, khususnya kandungan likopen.

Secara teoretis, hasil penelitian ini memperkuat konsep bahwa produksi metabolit sekunder pada tanaman dipengaruhi oleh interaksi antara faktor biotik dan abiotik. PGPR sebagai agen biologis dan cekaman air sebagai faktor lingkungan berperan bersama dalam mengatur jalur metabolisme tanaman (Vurukonda et al., 2018; Kaushal & Wani, 2017; Etesami & Maheshwari, 2018). Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi penggunaan PGPR dan irigasi defisit terkontrol dapat menjadi strategi untuk meningkatkan kualitas nutrisi buah tomat, khususnya kandungan antioksidan. Hal ini penting dalam pengembangan pertanian yang berorientasi pada kualitas hasil, bukan hanya kuantitas (Rouphael & Colla, 2020).

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa aplikasi PGPR dapat meningkatkan kandungan metabolit sekunder melalui peningkatan aktivitas fisiologis tanaman. Selain itu, beberapa studi juga menunjukkan bahwa cekaman air ringan dapat meningkatkan kandungan antioksidan pada tanaman hortikultura (Sarker & Oba, 2018; Alam et al., 2021). Namun, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan menunjukkan bahwa kombinasi PGPR dan irigasi defisit memberikan efek yang lebih optimal dibandingkan perlakuan tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan integratif antara faktor biologis dan manajemen air memiliki potensi besar dalam meningkatkan kualitas hasil pertanian (Basu et al., 2021).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi pupuk cair berbasis mikroba (PGPR) dan interval irigasi defisit berpengaruh sangat nyata terhadap efisiensi penggunaan air, status fisiologis, dan kualitas buah tomat. Perlakuan terbaik diperoleh pada kombinasi PGPR 10 ml/L dengan irigasi defisit 3 hari sekali (A2B3), yang menghasilkan nilai Water Use Efficiency (WUE) tertinggi sebesar 12,63 g/L dan kandungan likopen tertinggi sebesar 51,57 mg/kg. Sementara itu, nilai indeks kandungan klorofil (SPAD) tertinggi diperoleh pada perlakuan A2B1 sebesar 45,57, yang menunjukkan bahwa kondisi air optimal lebih mendukung pembentukan klorofil. Hasil penelitian menegaskan adanya interaksi nyata antara PGPR dan irigasi, di mana kombinasi keduanya mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air sekaligus kualitas hasil tanaman. Peningkatan nilai WUE hingga lebih dari 50% dibandingkan kontrol menunjukkan efektivitas pendekatan ini dalam sistem budidaya hemat air. Secara ilmiah, penelitian ini memperkuat konsep integrasi faktor biologis dan manajemen air dalam pertanian berkelanjutan. Secara praktis, teknologi ini berpotensi diterapkan sebagai strategi adaptif dalam menghadapi keterbatasan air sekaligus meningkatkan kualitas nutrisi hasil panen. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji mekanisme fisiologis dan molekuler serta menguji penerapan pada skala lapangan yang lebih luas.

Daftar Pustaka

- Alam, M. A., Seetharam, K., Zaidi, P. H., Dinesh, A., & Vinayan, M. T. (2021). Drought stress enhances antioxidant compounds. *Plants*, *10*(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/plants10030512>
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B., & Zohaib, A. (2017). Drought tolerance in plants: Physiology and management. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-2>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Mechanisms and applications. *Soil Biology and Biochemistry*, *121*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.012>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & Enshasy, H. E. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria as biostimulants. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 1–23. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.634602>
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. M. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production. *Agricultural Water Management*, *173*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.015>
- Coyago-Cruz, E., Corell, M., Moriana, A., Mapelli-Brahm, P., Hernanz, D., Stinco, C. M., & Meléndez-Martínez, A. J. (2019). Effect of irrigation on tomato quality. *Agricultural Water Management*, *219*, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.016>
- Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2017). Global synthesis of drought effects on crops. *Agricultural Water Management*, *179*, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.019>
- Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd-Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104>
- Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *15*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1568-0>
- FAOSTAT. (2021). Food and Agriculture Organization statistical database. <https://doi.org/10.4060/cb4477en>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2017). Plant drought stress: Effects and management. *Agronomy for Sustainable Development*, *29*, 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Favati, F., Lovelli, S., Galgano, F., Miccolis, V., Di Tommaso, T., & Candido, V. (2019). Processing tomato quality under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, *216*, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.024>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2017). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, *68*(4), 839–850. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw506>
- Glick, B. R. (2017). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, *2017*, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2017/9634018>
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (2018). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119050599>
- Gupta, G., Parihar, S. S., Ahirwar, N. K., Snehi, S. K., & Singh, V. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria: Current and future prospects. *Journal of King Saud University – Science*, *32*(2), 1219–1228. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.05.003>
- Kaushal, M., & Wani, S. P. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria: Mechanisms and applications. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *62*(3), 1–15. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1080662>
- Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., & Srivastava, R. (2021). PGPR: A sustainable approach for plant growth. *Rhizosphere*, *17*, 100321. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100321>

- Kuscu, H., Turhan, A., Demir, A. O., & Ozmen, N. (2018). Optimizing irrigation for tomato yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 234, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.030>
- Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119492443>
- Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2019). The role of PGPR in improving plant stress tolerance. *Applied Soil Ecology*, 123, 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.12.020>
- Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of plant growth promotion by rhizobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01556>
- Patanè, C., Tringali, S., & Sortino, O. (2017). Effects of deficit irrigation on tomato quality. *Scientia Horticulturae*, 217, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.009>
- Ripoll, J., Urban, L., Staudt, M., Lopez-Lauri, F., Bidet, L. P. R., & Bertin, N. (2018). Water deficit effects on tomato quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00516>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Ruzzi, M., & Aroca, R. (2017). Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants. *Plant Cell Reports*, 36, 871–884. <https://doi.org/10.1007/s00299-017-2112-2>
- Sandhya, V., Ali, S. Z., Grover, M., Reddy, G., & Venkateswarlu, B. (2017). Effect of plant growth promoting bacteria. *Plant Growth Regulation*, 69, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9771-2>
- Sarker, U., & Oba, S. (2018). Drought stress enhances nutritional and antioxidant properties. *Scientia Horticulturae*, 237, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.017>
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Boyce, A. N. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 183, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.004>
- Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & Sk, Z. A. (2018). Enhancement of drought stress tolerance in crops by PGPR. *Microbiological Research*, 206, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.003>