

EFEKTIVITAS JENIS NUTRISI DAN KONSENTRASI PLANT GROWTH PROMOTING RHIZOBACTERIA (PGPR) TERHADAP PERTUMBUHAN DAN HASIL SELADA MERAH (*Lactuca sativa*, L.) PADA SISTEM HIDROPONIK RAKIT APUNG

EFFECTIVENESS OF NUTRIENT TYPES AND PLANT GROWTH PROMOTING RHIZOBACTERIA (PGPR) CONCENTRATIONS ON THE GROWTH AND YIELD OF RED LETTUCE (*Lactuca sativa* L.) IN FLOATING RAFT HYDROPONIC SYSTEM

Adinda Nur Hasanah, Rugayah*, Sri Yusnaini, Sri Ramadiana

¹Pertanian, Universitas Lampung, Lampung, Indonesia

*Corresponding Author. E-mail address: rugayah.1961@fp.unila.ac.id

PERKEMBANGAN ARTIKEL:

Diterima: 5-9-2026

Direvisi: 28-9-2026

Disetujui: 2-10-2026

KEYWORDS:

AB-mix, Floating Raft
Hydroponic System,
Growmore, PGPR, Red
Lettuce

ABSTRACT

*Red lettuce (*Lactuca sativa* L.) is a vegetable with high economic and nutritional value that can be cultivated in hydroponic systems. The success of hydroponic cultivation is influenced by nutrient availability. However, the use of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a biological stimulant combined with various nutrient sources in hydroponic systems is still not widely used. This study aimed to analyze the effectiveness of nutrient types and PGPR concentrations on the growth and yield of red lettuce grown in a floating raft hydroponic system. The experiment was conducted at the Integrated Field Laboratory Greenhouse, Faculty of Agriculture, University of Lampung, from February to March 2026 was designed as 2 × 4 factorial Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The first factor was the type of nutrient used, which included of AB-mix (N1) and Growmore 32-10-10 (N2). The second factor was the concentration of PGPR, which included of 0 mL/L (P0), 8 mL/L (P1), 16 mL/L (P2), and 24 mL/L (P3). The results showed that AB-mix produced higher growth and yield of red lettuce than Growmore 32-10-10 across all observed variables. Each incremental increase in PGPR concentration up to 24 mL/L improved the growth and yield of red lettuce across all observed variables. The interaction between nutrient type and PGPR concentration indicated that AB-mix resulted in greater growth and yield responses than Growmore 32-10-10. In addition, root components (root length, root fresh weight, and root volume) were very strongly correlated with plant fresh weight.*

ABSTRAK

KATA KUNCI:

AB-Mix, Growmore 32-10-10, Hidroponik Rakit Apung, PGPR, Selada Merah

Selada merah (*Lactuca sativa* L.) merupakan sayuran dengan nilai ekonomi dan gizi tinggi serta dapat dibudidayakan pada sistem hidroponik. Keberhasilan sistem hidroponik dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi. Namun, pemanfaatan PGPR sebagai stimulan biologis yang dikombinasikan dengan berbagai jenis nutrisi pada sistem hidroponik masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas jenis nutrisi dan konsentrasi PGPR terhadap pertumbuhan dan hasil selada merah pada sistem hidroponik rakit apung. Penelitian dilaksanakan di Rumah Kaca Laboratorium Lapang Terpadu, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung pada Februari hingga Maret 2026 menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktorial 2x4 dengan tiga ulangan. Faktor pertama yaitu jenis nutrisi, yang terdiri atas AB-mix (N1) dan Growmore 32-10-10 (N2). Faktor kedua yaitu konsentrasi PGPR, terdiri atas 0 mL/L (P0), 8 mL/L (P1), 16 mL/L (P2), dan 24 mL/L (P3). Hasil penelitian menunjukkan bahwa AB-mix menghasilkan pertumbuhan dan hasil selada merah yang lebih tinggi dibandingkan dengan Growmore 32-10-10 pada seluruh variabel pengamatan. Setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR hingga taraf 24 mL/L dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil selada merah pada seluruh variabel pengamatan. Interaksi antara jenis nutrisi dan konsentrasi PGPR menunjukkan bahwa penggunaan AB-mix memberikan respons pertumbuhan dan hasil yang lebih tinggi dibandingkan Growmore 32-10-10. Selain itu, variabel komponen akar (panjang, bobot dan volume akar) berkorelasi sangat kuat dengan bobot segar tanaman.

1. PENDAHULUAN

Selada merah (*Lactuca sativa* L. var. Red Rapid) merupakan komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi dan kandungan gizi yang tinggi. Kandungan antosianin, vitamin C, dan flavonoid yang lebih tinggi dibandingkan selada hijau menjadikan selada merah sebagai sumber antioksidan yang bermanfaat bagi kesehatan (Bucky et al., 2024). Tingginya permintaan terhadap produk sayuran yang berkualitas dan higienis mendorong penerapan teknologi budidaya yang lebih efisien, salah satunya melalui sistem hidroponik.

Sistem hidroponik merupakan sistem budidaya tanpa menggunakan tanah yang mampu menyediakan air dan nutrisi secara terkendali sehingga menghasilkan produk yang memiliki kualitas lebih baik. Selain itu, hidroponik lebih efisien dalam penggunaan air sebesar 90% dan pupuk hingga 60% lebih tinggi dibandingkan budidaya konvensional (Regmi et al., 2024). Salah satu sistem hidroponik yang banyak digunakan untuk budidaya selada adalah sistem rakit apung, yaitu sistem yang menempatkan tanaman pada rakit sehingga akar tanaman terendam dan kontak langsung dengan larutan nutrisi (Gustiar et al., 2025). Selain ketepatan pemilihan sistem hidroponik, keberhasilan sistem budidaya sayur juga ditentukan oleh komposisi nutrisi yang digunakan seperti dilaporkan Ali et al. (2025).

Keberhasilan budidaya hidroponik sangat ditentukan oleh ketersediaan nutrisi karena kebutuhan hara tanaman dipenuhi melalui larutan nutrisi. Nutrisi AB-mix dan Growmore 32-10-10 merupakan sumber hara yang umum digunakan dalam budidaya hidroponik karena mengandung unsur hara makro dan mikro yang dibutuhkan oleh tanaman. Prinsip pengelolaan nutrisi dalam sistem hidroponik mempertimbangkan keseimbangan antara kebutuhan hara tanaman dan ketersediaan hara dalam larutan (Langenfeld et al., 2022). Namun, pendekatan yang berfokus pada pemenuhan nutrisi anorganik belum sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhan biologis tanaman di zona perakaran.

Keberadaan mikroorganisme menguntungkan pada zona perakaran juga berperan dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Perakaran pada sistem hidroponik berada dalam larutan nutrisi sehingga eksudat akar cenderung menyebar ke dalam larutan (Azizoglu et al., 2021). Kondisi tersebut menyebabkan zona perakaran memiliki aktivitas biologis yang lebih rendah, sehingga tanaman lebih bergantung pada larutan nutrisi tanpa dukungan stimulasi biologis. Sehingga, diperlukan pendekatan yang mampu meningkatkan aktivitas biologis di sekitar perakaran, salah satunya melalui aplikasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR).

Penggunaan PGPR mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui peningkatan penyerapan nutrisi, produksi fitohormon, serta peningkatan toleransi terhadap stres lingkungan. Pada sistem hidroponik, PGPR dapat berkolonisasi pada zona perakaran dan berinteraksi langsung dengan akar tanaman sehingga mendukung pertumbuhan dan hasil tanaman (Stegelman et al., 2022). Dasgan et al. (2023) melaporkan bahwa kombinasi PGPR dengan pengurangan pupuk mineral hingga 50% mampu menghasilkan pertumbuhan dan hasil selada yang setara dengan penggunaan 100% pupuk mineral serta meningkatkan kandungan antioksidan tanaman. Namun, penelitian mengenai perbedaan karakteristik formulasi jenis nutrisi dan peningkatan konsentrasi PGPR terhadap pertumbuhan dan hasil selada merah pada sistem hidroponik rakit apung masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas dua jenis nutrisi dan konsentrasi PGPR terhadap pertumbuhan dan hasil selada merah pada sistem hidroponik rakit apung.

2. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari sampai Maret 2026 di Rumah Kaca Laboratorium Lapang Terpadu, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Penelitian ini disusun dengan menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) pola faktorial (2×4) dengan tiga kali

ulangan. Faktor pertama adalah jenis nutrisi hidroponik yang terdiri atas AB-mix Paramudita (N1) dan Growmore 32-10-10 (N2), sedangkan faktor kedua adalah konsentrasi PGPR yaitu 0 mL/L (P0), 8 mL/L (P1), 16 mL/L (P2), dan 24 mL/L (P3). Pada label kemasan tertulis informasi bahwa PGPR Bactegrowth mengandung konsorsium mikroba *Bacillus subtilis* $9,6 \times 10^{12}$ CFU/gr, *Pseudomonas fluorescense* $1,0 \times 10^{12}$ CFU/gr, *Azotobacter* sp. $1,0 \times 10^{12}$ CFU/gr, dan *Azospirillum* sp. $1,0 \times 10^{12}$ CFU/gr. Pengelompokan didasarkan pada keseragaman tinggi bibit selada merah. Setiap satuan percobaan terdiri atas enam tanaman pada hidroponik rakit apung menggunakan bak plastik berukuran $39 \times 31 \times 13$ cm, sehingga jumlah total populasi penelitian berjumlah 144 tanaman.

Benih selada merah varietas Kayla Red yang telah direndam dalam larutan PGPR sesuai dengan perlakuan disemai pada media *rockwool*. Bibit dipindahkan ke instalasi hidroponik pada umur 21 hari setelah semai (HSS) atau setelah memiliki 3 - 4 helai daun sejati. Larutan nutrisi AB-mix dibuat dengan konsentrasi larutan A dan B masing-masing 5 mL/L air serta Growmore 32-10-10 dengan konsentrasi 2 g/L air. PGPR Bactegrowth dibuat menjadi larutan dengan melarutkan 1 gram produk dalam 1 liter air, kemudian diencerkan sesuai konsentrasi perlakuan. Aplikasi PGPR dilakukan dengan cara merendam benih selama 30 menit, menyiram media semai, dan penyemprotan setelah pindah tanam pada umur 7, 14, dan 21 hari setelah tanam (HST). Sebelum aplikasi, *hand sprayer* dikalibrasi agar tanaman menerima jumlah volume semprot yang sama yaitu sebanyak 5 mL dengan konsentrasi sesuai dengan perlakuan. Pemeliharaan tanaman meliputi pengaturan volume larutan nutrisi, pemeriksaan tingkat keasaman dengan menggunakan pH meter, dan kepekatan larutan menggunakan TDS meter serta pengendalian hama menggunakan *yellow trap*. Suhu serta kelembapan relatif rumah kaca diukur setiap hari menggunakan alat termohigrometer. Pemanenan dilakukan secara destruktif pada umur 28 HST.

Variabel yang digunakan dalam pengamatan mencakup tinggi tanaman, jumlah daun, panjang daun, lebar daun, diameter batang, kehijauan daun yang diukur dengan menggunakan alat SPAD, bobot segar tanaman, panjang akar, bobot segar akar, dan volume akar. Variabel pendukung meliputi pH larutan nutrisi, suhu, dan kelembapan relatif di dalam rumah kaca. Data pengamatan umur 28 hst diuji homogenitas ragam menggunakan uji Bartlett dan aditivitas dengan menggunakan uji Tukey. Data yang memenuhi asumsi dianalisis dengan menggunakan uji analisis ragam (uji F) pada taraf signifikansi 5%, kemudian dilanjutkan dengan uji Ortogonal Kontras dan Ortogonal Polinomial.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa jenis nutrisi dan konsentrasi PGPR memengaruhi semua variabel yang diamati yaitu: tinggi tanaman, jumlah daun, panjang daun, lebar daun, diameter batang, kehijauan daun, bobot segar tanaman, panjang akar, bobot segar akar, dan volume akar. Interaksi antara jenis nutrisi dan PGPR hanya terlihat pada variabel bobot segar tanaman.

3.1 Tinggi Tanaman

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 1) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan tinggi tanaman yang lebih tinggi sebesar 47,99% dibandingkan dengan nutrisi Growmore 32-10-10. Perlakuan dengan konsentrasi PGPR menunjukkan pengaruh linear positif terhadap pertumbuhan tinggi tanaman selada merah. Peningkatan satu unit konsentrasi PGPR akan meningkatkan tinggi tanaman sebesar 0,1957 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Tinggi tanaman yang lebih tinggi pada perlakuan AB-mix diduga disebabkan oleh komposisi

unsur hara yang lebih lengkap dan seimbang, sehingga mampu memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman selama fase pertumbuhan vegetatif. Ketersediaan unsur hara makro dan mikro yang optimal membantu proses pembelahan serta pemanjangan sel, sehingga pertumbuhan tanaman berlangsung lebih optimal. Hal ini sesuai dengan Salsabila *et al.*, (2025) yang melaporkan bahwa penggunaan AB-mix menghasilkan pertumbuhan tanaman selada hidroponik yang lebih optimal dibandingkan dengan nutrisi alternatif lainnya. Stegelmeier *et al.* (2022) juga menyatakan bahwa penggunaan PGPR dapat meningkatkan ketersediaan dan penyerapan unsur hara serta menghasilkan fitohormon, seperti auksin, sitokinin, dan giberelin, yang berperan dalam merangsang proses pembelahan dan pemanjangan sel.

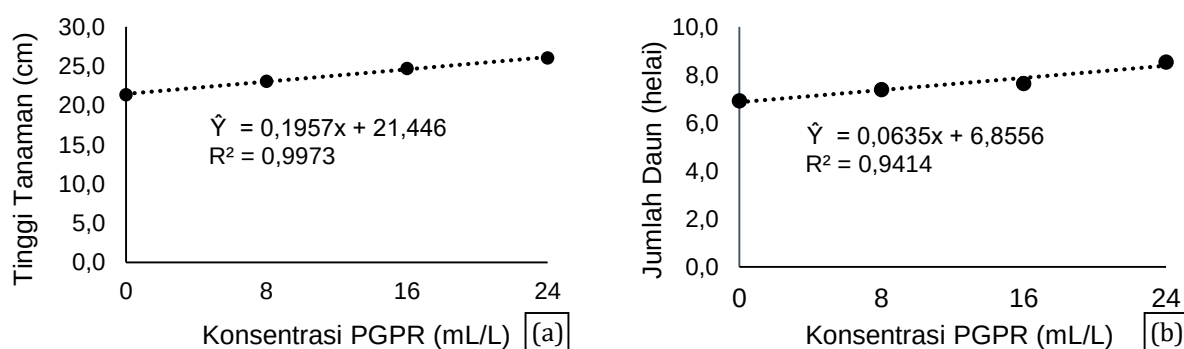
3.2 Jumlah Daun

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 1) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan jumlah daun yang lebih banyak sebesar 23,065% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Perlakuan konsentrasi PGPR menunjukkan pengaruh linear positif terhadap jumlah daun selada merah. Setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR akan meningkatkan jumlah daun sebesar 0,0635 (Gambar 1). Jumlah daun yang lebih banyak pada perlakuan

Tabel 1. Uji Ortogonal Kontras dan Ortogonal Polinomial pada Tinggi Tanaman (cm) dan Jumlah Daun (helai) Tanaman Selada Merah pada Umur 28 hst

Perbandingan	Tinggi Tanaman (cm)			Jumlah Daun (helai)		
	Q	Selisih (%)	F-Hit	Q	Selisih (%)	F-Hit
Jenis Nutrisi (N)						
K ₁ : N ₁ vs N ₂	-180,27	47,99	2318,68*	-3,83	23,065	221,241*
Konsentrasi PGPR (P)						
K ₂ : P-Linear	93,93	-	125,92*	8,17	-	72,465*
K ₃ : P-Kuadratik	-2,13	-	0,32 ^{tn}	1,17	-	2,434 ^{tn}
N x P						
K ₄ : K ₁ vs K ₂	-12,13	-	2,10 ^{tn}	-0,83	-	0,002 ^{tn}
K ₅ : K ₁ vs K ₃	3,67	-	0,96 ^{tn}	-0,50	-	0,270 ^{tn}
KT-Galat			0,58			0,117
F (0,05)			2,76			2,764

Keterangan: tn = Tidak berbeda nyata pada taraf α 5%; * = berbeda nyata pada taraf α 5%; N₁ = jenis nutrisi AB-mix; N₂ = jenis nutrisi Growmore 32-10-10



Gambar 1. Pengaruh konsentrasi PGPR pada tanaman selada merah umur 28 hst: (a) tinggi tanaman dan (b) jumlah daun.

AB-mix menunjukkan bahwa nutrisi tersebut mampu mendukung pembentukan organ vegetatif secara lebih optimal dibandingkan dengan Growmore 32-10-10.

Peningkatan jumlah daun diduga berkaitan dengan kemampuan PGPR menghasilkan sitokinin yang berperan dalam mempertahankan aktivitas pembelahan sel pada meristem pucuk sehingga pembentukan primordia daun berlangsung lebih aktif (Vocciante et al. 2022). *Bacillus subtilis* diketahui mampu melarutkan fosfat, sedangkan *Pseudomonas* sp. menghasilkan siderofor yang meningkatkan ketersediaan Fe di daerah perakaran (Stegelman et al., 2022). Ketersediaan fosfor berperan dalam penyediaan energi melalui ATP untuk pembelahan sel, sedangkan Fe merupakan unsur esensial dalam pembentukan klorofil dan proses transfer elektron pada fotosintesis (Marschner, 2012). Kombinasi mekanisme tersebut diduga meningkatkan pembentukan daun pada selada merah.

3.3 Panjang Daun

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 2) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan panjang daun yang lebih tinggi sebesar 41,19% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Pada perlakuan AB-mix, setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR meningkatkan panjang daun selada merah sebesar 0,1602 cm, sedangkan pada Growmore 32-10-10 sebesar 0,1072 cm. Hal ini menunjukkan bahwa respons peningkatan panjang daun terhadap aplikasi PGPR lebih tinggi pada penggunaan AB-mix dibandingkan dengan Growmore 32-10-10 (Gambar 2).

Respons peningkatan panjang daun yang lebih tinggi pada perlakuan AB-mix juga menunjukkan bahwa efektivitas PGPR dipengaruhi oleh kecukupan nutrisi yang tersedia bagi tanaman. Pada sistem hidroponik, genus *Pseudomonas* diketahui mampu meningkatkan akumulasi IAA pada jaringan daun sehingga meningkatkan panjang daun dan luas daun tanaman selada. IAA berperan sebagai auksin yang merangsang pemanjangan dan ekspansi sel, sedangkan kemampuan *Pseudomonas* dalam melarutkan fosfat, memfiksasi nitrogen, menghasilkan siderofor, dan enzim ACC deaminase meningkatkan ketersediaan unsur hara (Thomas et al., 2024). Selain *Pseudomonas*, *Bacillus* juga diketahui menghasilkan IAA dan giberelin (Stegelman et al., 2022). Hal tersebut didukung oleh Putra et al. (2024) yang melaporkan bahwa inokulasi *P. lundensis* dan *P. migulae* pada selada hidroponik NFT meningkatkan akumulasi IAA yang diikuti oleh peningkatan jumlah dan luas daun.

3.4 Lebar Daun

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 2) menunjukkan bahwa nutrisi AB-mix menghasilkan lebar daun yang lebih tinggi sebesar 44,16% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Pada perlakuan AB-mix, setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR meningkatkan lebar daun selada merah sebesar 0,1004 cm, sedangkan pada Growmore 32-10-10 sebesar 0,0574 cm. Hal ini menunjukkan bahwa respons peningkatan lebar daun terhadap aplikasi PGPR lebih tinggi pada penggunaan AB-mix dibandingkan dengan Growmore 32-10-10 (Gambar 2). Lebar daun yang lebih tinggi pada perlakuan AB-mix menunjukkan bahwa nutrisi tersebut mampu mendukung ekspansi lamina daun secara lebih optimal dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Kondisi ini diduga berkaitan dengan ketersediaan unsur hara yang seimbang sehingga proses fotosintesis berlangsung lebih efisien dan menghasilkan fotosintat yang dapat mendukung pelebaran daun.

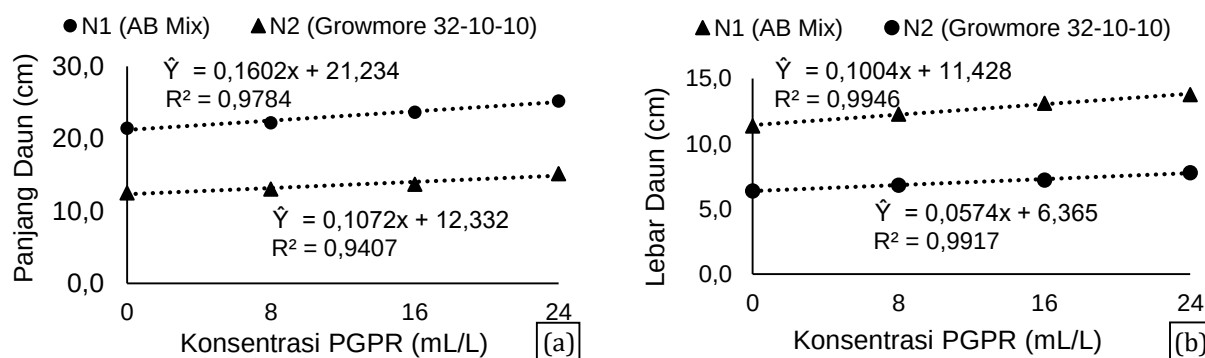
Unsur kalium berperan penting dalam mengatur tekanan turgor sel yang diperlukan selama proses ekspansi sel, sedangkan nitrogen mendukung pembentukan klorofil dan protein yang menunjang pertumbuhan jaringan daun (Marschner, 2012). Respons peningkatan lebar daun

yang lebih tinggi pada perlakuan AB-mix menunjukkan bahwa efektivitas PGPR dipengaruhi oleh kecukupan nutrisi yang tersedia. Genus *Pseudomonas* dilaporkan mampu meningkatkan luas daun selada melalui produksi IAA yang merangsang ekspansi sel, disertai peningkatan ketersediaan fosfat, fiksasi nitrogen, produksi siderofor, dan aktivitas ACC deaminase yang mendukung pertumbuhan tanaman (Mei et al., 2023). Selain itu, Stegelmeier et al., (2022) melaporkan bahwa *Bacillus* dan *Pseudomonas* meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara serta produksi fitohormon sehingga mendukung perkembangan tajuk tanaman.

Tabel 2. Uji Ortogonal Kontras dan Ortogonal Polinomial pada Panjang Daun (cm) dan Lebar Daun (cm) Tanaman Selada Merah pada Umur 28 hst

Perbandingan	Panjang Daun (cm)			Lebar Daun (cm)		
	Q	Selisih (%)	F-Hit	Q	Selisih (%)	F-Hit
Jenis Nutrisi (N)						
K ₁ : N1 vs N2	-114,47	41,19	1250,98*	-66,95	44,16	586,61*
Konsentrasi PGPR (P)						
K ₂ : P-Linear	64,17	-	78,62*	37,88	-	37,56*
K ₃ : P-Kuadratik	5,13	-	2,52 ^{tn}	-0,28	-	0,01 ^{tn}
N x P						
K ₄ : K ₁ vs K ₂	-12,73	-	3,10*	-10,32	-	2,70*
K ₅ : K ₁ vs K ₃	0,30	-	0,01 ^{tn}	1,25	-	0,20 ^{tn}
Tanggapan Pemberian Konsentrasi PGPR terhadap Jenis Nutrisi						
P0 : N1 vs N2	-26,83	41,67	274,98*	-14,93	43,77	116,74*
P1 : N1 vs N2	-27,45	41,18	287,77*	-16,37	44,45	140,23*
P2 : N1 vs N2	-29,93	42,12	342,19*	-17,73	45,05	164,62*
P3 : N1 vs N2	-30,25	39,93	349,47*	-17,92	43,38	168,04*
Tanggapan Pemberian Jenis Nutrisi terhadap Konsentrasi PGPR						
N1 Linear	-38,45	-	56,46*	-24,10	-	30,40*
N1 Kuadratik	-2,42	-	1,12 ^{tn}	0,77	-	0,15 ^{tn}
N2 Linear	25,72	-	25,26*	13,78	-	9,95*
N2 Kuadratik	2,72	-	1,41 ^{tn}	0,48	-	0,06 ^{tn}
KT-Galat			0,44			0,32
F (0,05)			2,76			2,76

Keterangan: tn: Tidak berbeda nyata pada taraf α 5%, *: Berbeda nyata pada taraf α 5%, N1: Jenis nutrisi AB-mix, N2: Jenis nutrisi Growmore 32-10-10



Gambar 2. Pengaruh konsentrasi PGPR pada tanaman selada merah umur 28 hst: (a) panjang daun dan (b) lebar daun.

3.5 Diameter Batang

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 5) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan diameter batang yang lebih besar sebesar 54,25% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Perlakuan konsentrasi PGPR menunjukkan pengaruh linear positif terhadap diameter batang selada merah. Setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR akan meningkatkan diameter batang sebesar 0,0585 cm (Gambar 3).

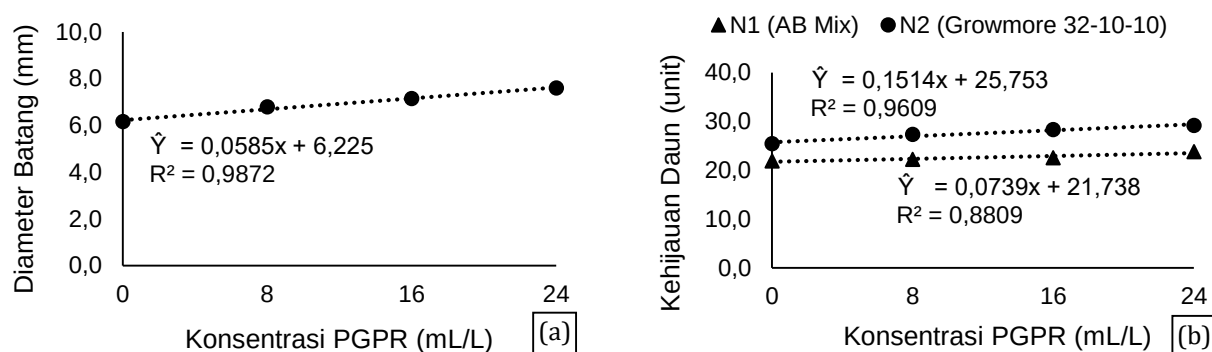
Peningkatan diameter batang pada perlakuan AB-mix mengindikasikan berlangsungnya pembelahan dan pembesaran sel batang yang lebih aktif dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Kondisi ini diduga karena ketersediaan unsur hara yang seimbang mendukung pembelahan dan pembesaran sel batang serta pembentukan jaringan vaskular (Marschner, 2012). Peningkatan diameter batang seiring bertambahnya konsentrasi PGPR menunjukkan bahwa hingga konsentrasi 24 mL/L, PGPR masih mampu meningkatkan perkembangan batang. Hal ini diduga karena *Bacillus* dan *Pseudomonas* meningkatkan ketersediaan hara melalui pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, dan produksi siderofor, serta menghasilkan IAA dan giberelin yang berperan dalam pembelahan, diferensiasi, dan pembesaran sel sehingga pembentukan jaringan xilem dan floem berlangsung lebih optimal (Stegelmeier et al., 2022).

3.6 Kehijauan Daun

Hasil uji kontras ortogonal (Tabel 3) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi Growmore 32-10-10 menghasilkan kehijauan daun yang lebih tinggi 17,93% dibandingkan dengan AB-mix. Pada perlakuan Growmore 32-10-10, setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR meningkatkan kehijauan daun selada merah sebesar 0,1514 unit, sedangkan pada AB-mix sebesar 0,0739 unit. Hal ini menunjukkan bahwa respons peningkatan kehijauan daun terhadap aplikasi PGPR lebih tinggi pada penggunaan Growmore 32-10-10 dibandingkan dengan AB-mix (Gambar 3). Kondisi ini diduga berkaitan dengan kandungan nitrogen yang lebih tinggi pada Growmore sehingga mendukung sintesis klorofil dan pembentukan protein fotosintetik.

Efektivitas bakteri PGPR dalam meningkatkan nilai kehijauan daun dipengaruhi oleh kecukupan nitrogen yang tersedia bagi tanaman. Hal tersebut didukung oleh Stegelmeier et al. (2022) yang menjelaskan bahwa *Azotobacter* dan *Azospirillum* merupakan jenis bakteri penambat nitrogen yang mampu meningkatkan ketersediaan nitrogen di daerah perakaran, sehingga membantu pembentukan klorofil. Selain itu, *Pseudomonas* dan *Bacillus* menghasilkan zat siderofor yang berperan dalam meningkatkan ketersediaan besi (Fe) sebagai unsur penting dalam proses pembentukan klorofil, sehingga kandungan klorofil daun mengalami peningkatan. Hasil tersebut sesuai dengan Dasgan et al., (2023) yang melaporkan bahwa penerapan PGPR meningkatkan kandungan klorofil tanaman selada, sehingga membantu proses fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif tanaman.

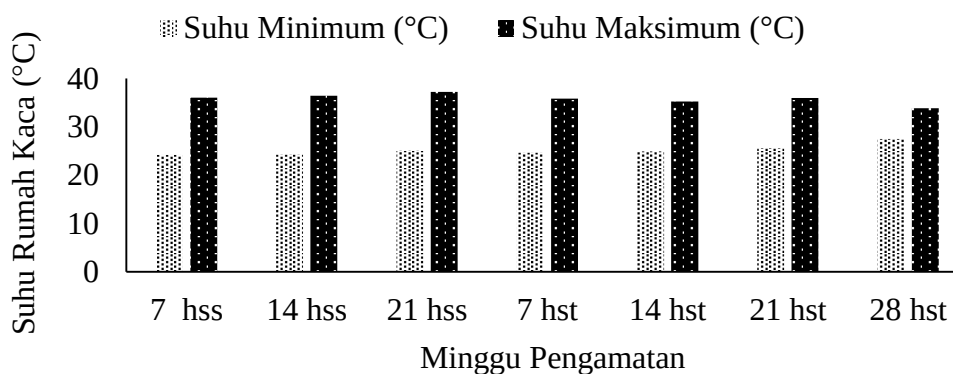
Daun selada merah pada semua perlakuan memiliki dominasi warna hijau dengan pigmentasi merah yang tipis di bagian tepi daun serta daun muda (Gambar 4). Kondisi tersebut kemungkinan besar dipengaruhi oleh suhu di dalam rumah kaca yang berkisar 24 hingga 37°C (Gambar 5) sehingga kurang mendukung akumulasi antosianin. Gazula et al. (2005) melaporkan bahwa peningkatan suhu hingga 30°C menyebabkan penurunan kandungan antosianin dalam daun selada merah. Hal tersebut didukung oleh Boo et al. (2011) yang menyatakan bahwa suhu yang melebihi rentang optimal (12–22°C) dapat menurunkan aktivitas enzim *phenylalanine ammonia-lyase* (PAL), yaitu enzim utama dalam proses biosintesis antosianin. Akibatnya, akumulasi antosianin tidak mencapai tingkat optimal sehingga warna merah pada daun selada menjadi semakin pudar dan akhirnya didominasi oleh warna hijau.



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi PGPR pada tanaman selada merah umur 28 hst: (a) diameter batang dan (b) kehijauan daun.



Gambar 4. Tampilan warna daun tanaman selada merah: (a) 15 hst, (b) 22 hst, dan (c) 28 hst.



Gambar 5. Temperatur rumah kaca selama pelaksanaan penelitian.

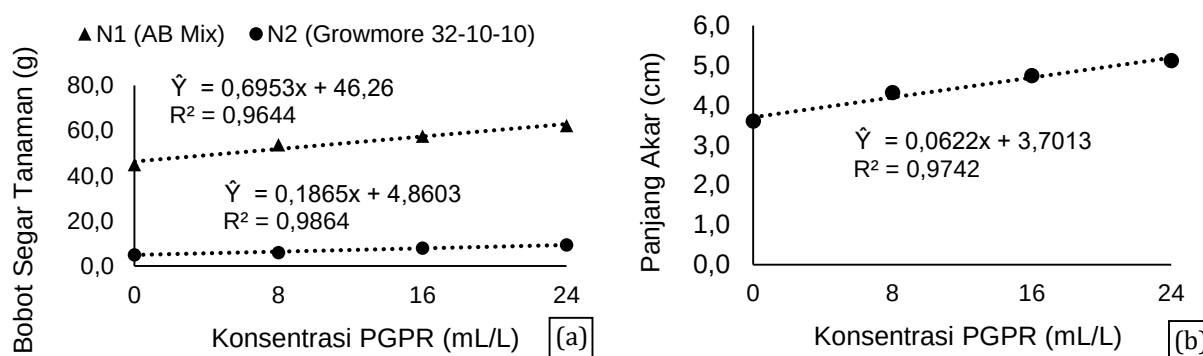
3.7 Bobot Segar Tanaman

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 3) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan bobot segar tanaman yang lebih tinggi sebesar 87,03% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Pada perlakuan AB-mix, setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR meningkatkan bobot segar selada merah sebesar 0,6953 g, sedangkan pada Growmore 32-10-10 sebesar 0,1865 g. Hal ini menunjukkan bahwa respons peningkatan bobot segar terhadap aplikasi PGPR lebih tinggi pada penggunaan AB-mix dibandingkan dengan Growmore 32-10-10 (Gambar 5). Bobot segar tanaman yang lebih tinggi pada perlakuan AB Mix dan PGPR diduga berkaitan dengan ketersediaan unsur hara yang lebih mendukung pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikroorganisme di daerah perakaran.

Tabel 3. Uji Ortogonal Kontras dan Ortogonal Polinomial pada Kehijauan Daun (unit) dan Bobot Segar Tanaman (g) Selada Merah pada Umur 28 hst

Perbandingan	Kehijauan Daun (unit)			Bobot Segar Tanaman(g)		
	Q	Selisih (%)	F-Hit	Q	Selisih (%)	F-Hit
Jenis Nutrisi (N)						
K ₁ : N1 vs N2	59,33	17,93	180,95*	-570,07	87,03	1533,81*
Konsentrasi PGPR (P)						
K ₂ : P-Linear	54,07	-	30,05*	211,62	-	42,27*
K ₃ : P-Kuadratik	-0,50	-	0,01 ^{tn}	-11,43	-	0,62 ^{tn}
N x P						
K ₄ : K ₁ vs K ₂	18,60	-	3,56*	-122,12	-	14,08*
K ₅ : K ₁ vs K ₃	-5,77	-	1,71 ^{tn}	13,17	-	0,82 ^{tn}
Tanggapan Pemberian Konsentrasi PGPR terhadap Jenis Nutrisi						
P0 : N1 vs N2	10,63	13,92	23,25*	-119,84	88,85	271,13*
P1 : N1 vs N2	15,25	18,60	47,81*	-142,91	87,38	385,55*
P2 : N1 vs N2	17,30	20,36	61,53*	-148,71	84,75	417,52*
P3 : N1 vs N2	16,15	18,46	53,62*	-158,61	87,51	474,94*
Tanggapan Pemberian Jenis Nutrisi terhadap Konsentrasi PGPR						
N1 Linear	-17,73	-	6,47*	-166,87	-	52,57*
N1 Kuadratik	-2,63	-	0,21 ^{tn}	12,30	-	1,43 ^{tn}
N2 Linear	36,33	-	27,14*	44,75	-	3,78*
N2 Kuadratik	-3,13	-	1,01 ^{tn}	0,87	-	0,01 ^{tn}
KT-Galat			0,81			8,83
F (0,05)			2,76			2,76

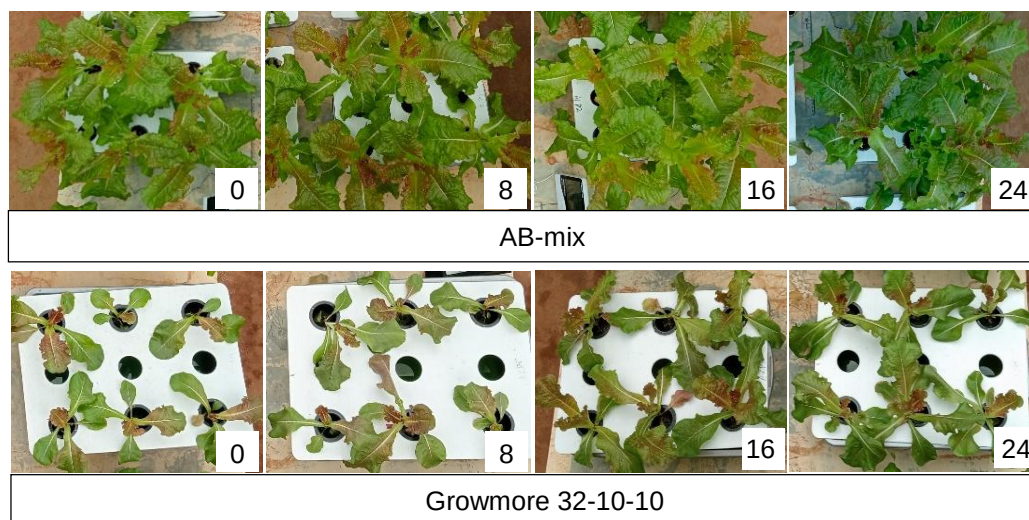
Keterangan: tn: Tidak berbeda nyata pada taraf α 5%, *: Berbeda nyata pada taraf α 5%, N1: Jenis nutrisi AB-mix, N2: Jenis nutrisi Growmore 32-10-10



Gambar 6. Pengaruh konsentrasi PGPR pada tanaman selada merah umur 28 hst: (a) bobot segar tanaman dan (b) panjang akar.

Ketersediaan fotosintat yang lebih besar pada tanaman yang tumbuh vigor diduga berkontribusi terhadap peningkatan jumlah eksudat akar yang dihasilkan. Penelitian yang dilakukan oleh Ma et al. (2022) menunjukkan bahwa adanya peningkatan pertumbuhan tanaman berkorelasi dengan peningkatan jumlah eksudat akar yang dilepaskan. Eksudat tersebut kemudian berfungsi sebagai sumber karbon bagi mikroorganisme di wilayah perakaran, sehingga memperkuat kolonisasi dan aktivitas bakteri PGPR. Namun, keterbatasan hara juga dapat mengubah komposisi eksudat akar, khususnya melalui peningkatan pelepasan asam organik dan fosfatase asam untuk membantu meningkatkan ketersediaan fosfor (Ma et al., 2022). Kondisi

tersebut diduga terjadi pada tanaman Growmore 32-10-10 yang memiliki bobot segar lebih rendah, pertumbuhan kurang vigor, dan daun yang lebih mudah mengalami kelayuan ketika suhu rumah kaca meningkat.



Gambar 7. Perbedaan tampilan pertumbuhan tanaman selada merah umur 28 hst pada pemberian AB-mix dan Growmore 32-10-10 dengan beberapa konsentrasi PGPR (mL/L).

Bobot segar tanaman yang rendah pada perlakuan Growmore 32-10-10 (Gambar 7) menunjukkan bahwa tingginya kandungan nitrogen saja belum mampu mendukung akumulasi biomassa secara optimal. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan karakteristik sistem hidroponik rakit apung menyebabkan akar kontak langsung dengan larutan nutrisi, sehingga tanaman merespons secara langsung komposisi dan keseimbangan unsur hara yang tersedia. Fathidarehniyeh *et al.* (2024) menjelaskan bahwa pada sistem hidroponik, komposisi larutan nutrisi merupakan faktor utama yang menentukan pertumbuhan tanaman. Berbeda dengan sistem hidroponik yang menggunakan media padat sebagai penyangga (*buffer*), akar pada sistem rakit apung terendam langsung dalam larutan nutrisi sehingga penggunaan Growmore 32-10-10 pada konsentrasi anjuran (2 g/L) diduga belum menghasilkan komposisi larutan nutrisi yang seimbang seperti AB-mix. Temuan ini sejalan dengan Aditya *et al.* (2023) yang melaporkan bahwa penggunaan Growmore pada konsentrasi 1,70–2,77 g/L masih mampu mendukung pertumbuhan *baby kailan* pada sistem hidroponik sumbu (*wick system*), namun pertumbuhan yang dihasilkan tetap lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan AB-mix.

3.8 Panjang Akar

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 5) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan panjang akar yang lebih besar sebesar 61,30% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Perlakuan konsentrasi PGPR menunjukkan pengaruh linear positif terhadap panjang akar selada merah. Setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR akan meningkatkan panjang akar sebesar 0,0622 cm (Gambar 6). Kondisi ini diduga karena akar merupakan lokasi utama kolonisasi PGPR, sehingga fitohormon dan senyawa pemacu tumbuh yang dihasilkan bakteri dapat langsung memengaruhi perkembangan sistem perakaran. Stegelmeier *et al.* (2022) menyatakan bahwa *Bacillus* dan *Pseudomonas* menghasilkan IAA yang berperan dalam merangsang pemanjangan akar dan pembentukan rambut akar sehingga memperluas daerah serapan unsur hara. Selain itu, Mei *et al.* (2023) melaporkan bahwa inokulasi *Pseudomonas*

lundensis, *P. psychrotolerans*, dan *P. migulae* pada selada hidroponik meningkatkan pertumbuhan akar melalui produksi IAA, pelarutan fosfat, dan fiksasi nitrogen.

Tabel 5. Uji Ortogonal Kontras dan Ortogonal Polinomial pada Diameter Batang (mm) dan Panjang Akar (cm) Tanaman Selada Merah pada Umur 28 hst

Perbandingan	Diameter Batang (mm)			Panjang Akar (cm)		
	Q	Selisih (%)	F-Hit	Q	Selisih (%)	F-Hit
Jenis Nutrisi (N)						
K ₁ : N1 vs N2	-61,88	54,25	608,50*	-352,63	61,30	4080,09*
Konsentrasi PGPR (P)						
K ₂ : P-Linear	28,08	-	25,06*	92,07	-	35,45*
K ₃ : P-Kuadratik	-1,02	-	0,16 ^{tn}	4,87	-	0,50 ^{tn}
N x P						
K ₄ : K ₁ vs K ₂	-5,05	-	0,81 ^{tn}	-6,63	-	0,18 ^{tn}
K ₅ : K ₁ vs K ₃	1,38	-	0,30 ^{tn}	4,57	-	0,44 ^{tn}
KT-Galat			0,26			0,02
F (0,05)			2,76			2,76

Keterangan: tn: Tidak berbeda nyata pada taraf α 5%, *: Berbeda nyata pada taraf α 5%, N1: Jenis nutrisi AB-mix, N2: Jenis nutrisi Growmore 32-10-10

3.9 Bobot Segar Akar

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 6) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan bobot segar akar yang lebih besar sebesar 36,065% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Pengaruh konsentrasi PGPR menunjukkan pengaruh linear positif terhadap bobot segar akar selada merah. Setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR berdampak pada peningkatan bobot segar akar sebesar 0,0622 g seperti yang terlihat pada Gambar 8. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua perlakuan tersebut mampu meningkatkan akumulasi biomassa akar. Perkembangan biomassa akar yang lebih baik pada tanaman diduga disebabkan oleh meningkatnya aktivitas fisiologis yang memicu produksi lebih banyak senyawa hasil fotosintesis untuk dialokasikan ke sistem perakaran. Ma et al. (2022) menyatakan bahwa tanaman yang tumbuh lebih vigor menghasilkan fotosintat lebih tinggi sehingga meningkatkan pelepasan eksudat akar. Selanjutnya, Afridi et al. (2024) melaporkan bahwa eksudat akar memiliki peran dalam membentuk komunitas mikroba di rizosfer, yang mendukung kolonisasi serta aktivitas bakteri PGPR. Peningkatan aktivitas PGPR tersebut meningkatkan efisiensi penyerapan air dan unsur hara, sehingga membantu pembentukan jaringan akar, serta meningkatkan akumulasi biomassa akar. Hal tersebut sesuai dengan Dasgan et al. (2023) yang melaporkan bahwa aplikasi PGPR dapat meningkatkan pertumbuhan akar dan biomassa tanaman selada dalam sistem budidaya hidroponik.

3.10 Volume Akar

Hasil uji ortogonal kontras (Tabel 6) menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi AB-mix menghasilkan volume akar yang lebih besar sebesar 36,065% dibandingkan dengan Growmore 32-10-10. Perlakuan konsentrasi PGPR menunjukkan pengaruh linear positif terhadap volume akar selada merah. Setiap peningkatan satu satuan konsentrasi PGPR akan meningkatkan volume akar sebesar 0,0142 mL (Gambar 8). Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua perlakuan mampu meningkatkan perkembangan sistem perakaran yang ditunjukkan oleh

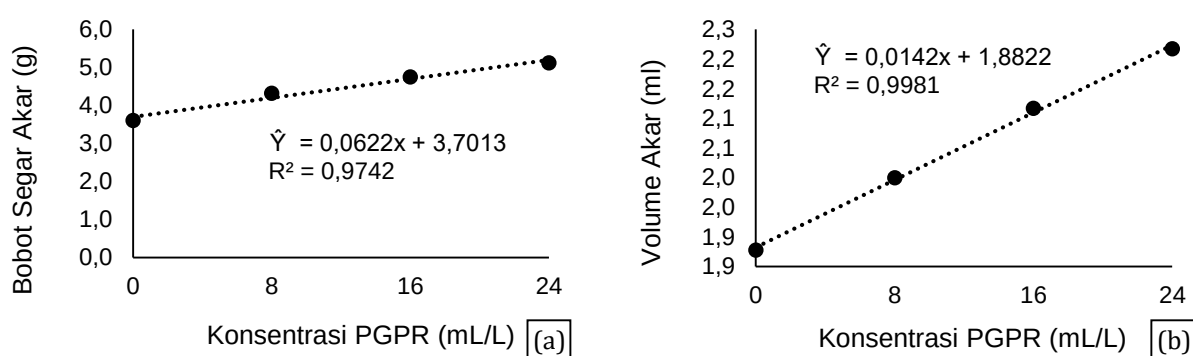
meningkatnya volume akar. Volume akar yang lebih besar mencerminkan berkembangnya percabangan akar dan rambut akar sehingga memperluas bidang kontak akar dengan larutan nutrisi.

Tabel 6. Uji Ortogonal Kontras dan Ortogonal Polinomial pada Bobot Segar Akar (g) dan Volume Akar (mL) Tanaman Selada Merah pada Umur 28 hst

Perbandingan	Bobot Segar Akar (g)			Volum Akar (ml)		
	Q	Selisih (%)	F-Hit	Q	Selisih (%)	F-Hit
Jenis Nutrisi (N)						
K ₁ : N1 vs N2	-78,05	84,46	342,55*	-18,524	54,65	880,74*
Konsentrasi PGPR (P)						
K ₂ : P-Linear	29,88	-	10,04*	6,823	-	23,90*
K ₃ : P-Kuadratik	-2,08	-	0,24 ^{tn}	6,823	-	23,90*
N x P						
K ₄ : K ₁ vs K ₂	-14,95	-	2,51 ^{tn}	-0,531	-	0,14 ^{tn}
K ₅ : K ₁ vs K ₃	1,62	-	0,15 ^{tn}	-0,250	-	0,16 ^{tn}
KT-Galat			0,74			0,02
F (0,05)			2,76			2,76

Keterangan: tn: Tidak berbeda nyata pada taraf α 5%, *: Berbeda nyata pada taraf α 5%, N1: Jenis nutrisi AB-mix, N2: Jenis nutrisi Growmore 32-10-10

Perkembangan sistem perakaran tersebut memungkinkan tanaman untuk mencari nutrisi secara lebih luas, sehingga mendorong pertumbuhan tanaman yang lebih baik. Vacheron *et al.* (2013) menunjukkan bahwa PGPR mengubah struktur sistem perakaran dengan memproduksi fitohormon, khususnya auksin, yang berperan dalam menginduksi akar lateral dan rambut akar. Hal tersebut didukung oleh Mei *et al.* (2023) yang melaporkan bahwa pemberian inokulasi *Pseudomonas lundensis*, *P. psychrotolerans*, dan *P. migulae* pada tanaman selada secara hidroponik mampu meningkatkan pertumbuhan sistem perakaran melalui mekanisme produksi asam indol-3-asetat (IAA), pelarutan fosfat, dan fiksasi nitrogen.



Gambar 8. Pengaruh jenis nutrisi dan konsentrasi PGPR pada tanaman selada merah umur 28 hst: (a) bobot segar akar dan (b) volume akar.

3.10 Uji Korelasi Komponen Akar dengan Bobot Segar Tanaman

Hasil uji korelasi menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat antara variabel panjang akar, bobot segar akar, dan volume akar dengan bobot segar tanaman. Nilai koefisien korelasi masing-masing adalah 0,9908 untuk panjang akar, 0,9860 untuk bobot segar akar, dan 0,9887 untuk volume akar. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya pertumbuhan sistem perakaran

akan berdampak pada peningkatan akumulasi biomassa tanaman. Aplikasi PGPR diduga mendorong pertumbuhan akar melalui dengan cara memperpanjang akar, meningkatkan jumlah biomassa akar, serta mengembangkan sistem perakaran yang lebih baik, sehingga kemampuan penyerapan air dan unsur hara menjadi lebih efisien. Ahmad *et al.* (2008) menjelaskan bahwa konsorsium bakteri dalam PGPR mampu menghasilkan fitohormon, seperti indole-3-acetic acid (IAA) dan giberelin, yang berfungsi untuk mendorong pertumbuhan, pemanjangan, percabangan, dan perkembangan akar. Selain itu, Stegelmeier *et al.* (2022) menjelaskan bahwa *Azotobacter* dan *Azospirillum* memiliki kemampuan menambat nitrogen, sehingga meningkatkan ketersediaan nitrogen bagi tanaman. Peningkatan kemampuan penyerapan ini memberikan lebih banyak air dan unsur hara untuk mendukung proses fotosintesis serta pembentukan biomassa tanaman. Temuan ini sesuai dengan Chen *et al.* (2025) yang melaporkan bahwa panjang akar total, luas permukaan akar, dan volume akar memiliki hubungan positif sangat signifikan dengan bobot segar tajuk (*shoot fresh weight*) pada tanaman selada yang ditanam dengan sistem hidroponik. Nilai koefisien korelasi antara komponen akar dan bobot segar tanaman selada merah dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai Koefisien Korelasi antara Variabel Komponen Akar dengan Bobot Segar Tanaman Selada Merah Umur 28 hst

Peubah	Bobot Segar Tanaman (g)
Panjang Akar (cm)	0,9908**
Bobot Segar Akar (g)	0,9860**
Volume Akar (ml)	0,9887**

Keterangan: ** korelasi positif sangat nyata pada taraf 1 %

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan AB-mix memberikan pertumbuhan dan hasil tanaman selada merah yang lebih baik dibandingkan dengan nutrisi Growmore 32-10-10. Nutrisi Growmore 32-10-10 menghasilkan tanaman yang ukurannya lebih kecil, namun memiliki tingkat kehijauan daun lebih tinggi dibandingkan dengan AB-mix. Pemberian PGPR pada berbagai tingkat konsentrasi mampu meningkatkan semua variabel pertumbuhan dan hasil tanaman selada merah secara linear dan positif. Respons tanaman tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi PGPR sampai taraf 24 mL/L menunjukkan peningkatan pertumbuhan yang semakin meningkat. Terdapat interaksi antara jenis nutrisi dan konsentrasi PGPR pada variabel panjang daun, lebar daun, kehijauan daun, dan bobot segar tanaman. Nutrisi AB-mix selalu memberikan pertumbuhan dan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan Growmore 32-10-10 pada berbagai taraf konsentrasi PGPR yang digunakan. Selain itu peningkatan komponen akar seperti panjang akar, bobot segar akar, dan volume akar menunjukkan korelasi positif yang sangat kuat dan positif dengan peningkatan bobot segar tanaman selada merah.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, G.N.G., Wiendi, A.M.N., dan Kartika, G.J. (2023). Efisiensi penggunaan pupuk majemuk terhadap pertumbuhan dan produksi baby kailan (*Brassica oleracea* L.) dengan hidroponik sistem sumbu. *Buletin Agrohorti*. 11(1):104-116.
- Afridi, S. M., Kumar, A., Javed, A. M., Dubey, A., Henrique, F., Medeiros, V. De, and Santoyo, G. (2024). Harnessing root exudates for plant microbiome engineering and stress resistance

- in plants. *Microbiological Research*. 279(1):1-20.
- Ahmad, F., Ahmad, I., and Khan, M. S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Reserch*. 163(2): 173-181.
- Ali, F., Yeni, Y., Rahhutami, R., Kartika, R., Tiara, D. (2025). Kajian formulasi nutrisi AB Mix dan varietas terhadap hasil cabai Keriting (*Capsicum annum* L.) secara hidroponik. *Jurnal Agrotropika*. 24(2): 300-307.
- Azizoglu, U., Yilmaz, N., Simsek, O., Ibal, J. C., Tagele, S. B., and Shin, J. H. (2021). The fate of plant growth-promoting rhizobacteria in soilless agriculture: future perspectives. *3 Biotech Springer International Publishing*. 11(8): 1-13.
- Boo, H.-O., Heo, B.-G., Gorinstein, S., and Chon, S.-U. (2011). Positive effects of temperature and growth conditions on enzymatic and antioxidant status in lettuce plants. *Plant Science*. 181(4): 479-484.
- Bucky, A., Pičmanová, M., Porley, V., Pont, S., Austin, C., Khan, T., McDougall, G., Johnstone, A., and Stewart, D. (2024). Light manipulation as a route to enhancement of antioxidant properties in red amaranth and red lettuce. *Frontiers in Nutrition* Frontiers. 11(1): 1-10.
- Chen, Y., Cheng, R., Haochun, K. E., Zhichao, C., Zhang, Y., and Li, K. (2025). Effects of irrigation mode on the growth of hydroponic lettuce in a plant factory. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 41(9): 183-190.
- Dasgan, H. Y., Yilmaz, D., Zikaria, K., Ikiz, B., and Gruda, N. S. (2023). Enhancing the yield quality and antioxidant content of lettuce through innovative and eco-friendly biofertilizer practices in hydroponics. *Horticulturae Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 9(12): 1-19.
- Gazula, A., Kleinhenz, M. D., Streeter, J. G., and Miller, A. R. (2005). Temperature and cultivar effects on anthocyanin and chlorophyll b concentrations in three related lollo rosso lettuce cultivars. *Horti Science*. 40(6): 1731-1733.
- Gustiar, F., Septiani, D., Agustina, H., Adriansyah, F., and Ramadhani, F. (2025). Growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown on different planting media volumes in a floating cultivation system. *Jurnal Lahan Suboptimal: Journal of Suboptimal Lands Universitas Sriwijaya - Pusat Inovasi Pembelajaran Unsri*. 14(1): 44-50.
- Ikiz, B., Dasgan, H. Y., and Gruda, N. S. (2024). Utilizing the power of plant growth promoting rhizobacteria on reducing mineral fertilizer, improved yield, and nutritional quality of Batavia lettuce in a floating culture. *Scientific Reports* Nature Publishing Group. 14(1): 1-12.
- Langenfeld, N. J., Pinto, D. F., Faust, J. E., Heins, R., and Bugbee, B. (2022). Principles of nutrient and water management for Indoor agriculture. *Sustainability* MDPI. 14(16): 1-25.
- Ma, W., Tang, S., and Dengzeng, Z. (2022). Root exudates contribute to belowground ecosystem hotspots: a review. *Frontiers in Microbiology*. 13(1): 1-19.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.)*. Academic Press. Amsterdam.
- Mei, C., Zhou, D., Chretien, R. L., Turner, A., Hou, G., Evans, M. R., and Lowman, S. (2023). A potential application of *Pseudomonas psychrotolerans* IALR632 for lettuce growth promotion in hydroponics. *Microorganisms* MDPI. 11(2): 1-11.
- Putra, A. M., Anastasya, N. A., Rachmawati, S. W., Yusnawan, E., Syib'li, M. A., Trianti, I., Setiawan, A., and Aini, L. Q. (2024). Growth performance and metabolic changes in lettuce inoculated with plant growth promoting bacteria in a hydroponic system. *Scientia Horticulturae*. 327: 1-15.
- Regmi, A., Rueda-Kunz, D., Liu, H., Trevino, J., Kathi, S., and Simpson, C. (2024). Comparing resource use efficiencies in hydroponic and aeroponic production systems. *Technology in Horticulture*. 4(1): 1-10.

- Salsabila, Cindy Rosnarita, and Elly Yanto. (2025). Pengaruh nutrisi AB Mix terhadap pertumbuhan dan hasil selada keriting (*Lactuca sativa* L.) dengan sistem hidroponik rakit apung. *Journal of Agricultural Technology an Natrural Farming*. 1(1): 24-29.
- Stegelmeier, A. A., Rose, D. M., Joris, B. R., and Glick, B. R. (2022). The use of PGPB to promote plant hydroponic growth. *Plants*. 11(20): 1-28.
- Thomas, B. O., Lechner, S. L., Ross, H. C., Joris, B. R., Glick, B. R., and Stegelmeier, A. A. (2024). Friends and foes bacteria of the hydroponic plant microbiome. *Plants Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 13(21): 1-32.
- Upadhyay, S. K., Srivastava, A. K., Rajput, V. D., Chauhan, P. K., Bhojiya, A. A., Jain, D., Chaubey, G., Dwivedi, P., Sharma, B., and Minkina, T. (2022). Root exudates mechanistic insight of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable crop production. *Frontiers in Microbiology*. 13(1): 1–9.
- Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Loccoz, Y. M., Muller, D., Legendre, L., Dye, F. W., and Combaret, C. P. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Plant Science*. 4(1): 1–19.
- Vocciante, M., Grifoni, M., Fusini, D., Petruzzelli, G., and Franchi, E. (2022). The role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Applied Science*. 12(1): 1–16.