

**SKRINING BAKTERI PELARUT FOSFAT ASAL EKOSISTEM MANGROVE BENGKALIS, RIAU
SEBAGAI KANDIDAT PEMACU PERTUMBUHAN JAGUNG (*Zea mays* L.)**

**SCREENING OF PHOSPHATE-SOLUBILIZING BACTERIA ISOLATED FROM
THE BENGKALIS MANGROVE ECOSYSTEM, RIAU, AS PLANT GROWTH-PROMOTING
CANDIDATES FOR MAIZE (*Zea mays* L.) GROWTH**

Hana Zahra, Delita Zul*

Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau, Jalan
HR. Soebrantas KM 12,5, Kota Pekanbaru 28293, Riau, Indonesia

*Korespondensi: delita.zul@lecturer.unri.ac.id

Diterima: 08 Juni 2026 / Direvisi: 09 Juli 2026 / Disetujui: 30 Juli 2026

ABSTRAK

Pengembangan biofertilizer berbasis mikroorganisme lokal merupakan strategi penting untuk meningkatkan produktivitas tanaman secara berkelanjutan. Ekosistem mangrove berpotensi menjadi sumber bakteri dengan kemampuan beragam, termasuk bakteri pelarut fosfat (BPF). Namun, informasi mengenai karakter multifungsi BPF asal mangrove di Bengkalis, Riau masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi 25 isolat BPF asal ekosistem mangrove Bengkalis sebagai kandidat agen biofertilizer melalui pengujian aktivitas selulolitik, pelarutan kalium, produksi hormon *indole-3-acetic acid* (IAA), kemampuan penambatan nitrogen, uji keamanan tanaman, serta potensinya dalam memacu pertumbuhan tanaman jagung (*Zea mays* L.). Hasil penelitian menunjukkan bahwa 12 isolat memiliki aktivitas selulolitik, 10 isolat mampu melarutkan kalium, 14 isolat mampu menambat nitrogen, dan seluruh isolat mampu menghasilkan hormon IAA dengan konsentrasi yang bervariasi. Berdasarkan sistem skoring yang mengintegrasikan berbagai karakter pemacu pertumbuhan tanaman, isolat SMK 2.1 memperoleh nilai tertinggi, diikuti isolat MA 2.3, SMB 2.1, dan RA 1.2 sebagai isolat potensial. Pada uji pemacuan pertumbuhan tanaman jagung umur 7 hari setelah tanam, isolat SMK 2.1 merupakan isolat paling potensial yang ditunjukkan oleh berat segar ($0,94 \pm 0,21$ g), panjang akar ($7,72 \pm 3,21$ cm), dan panjang tajuk ($19,5 \pm 5,27$ cm) yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Seluruh isolat juga menunjukkan hasil negatif pada uji keamanan tanaman. Meskipun pengujian masih terbatas pada fase awal pertumbuhan, hasil ini menunjukkan bahwa BPF asal mangrove Bengkalis berpotensi sebagai kandidat biofertilizer dan sumber agen hayati lokal untuk pertanian berkelanjutan.

Kata kunci: Biofertilizer, bakteri pelarut fosfat, ekosistem mangrove, indole-3-acetic acid, *plant growth-promoting bacteria*

ABSTRACT

The development of biofertilizers based on indigenous microorganisms is an important strategy to sustainably enhance crop productivity. Mangrove ecosystems represent potential sources of bacteria with diverse metabolic capabilities, including phosphate-solubilizing bacteria (PSB). However, information regarding the multifunctional characteristics of PSB isolated from the Bengkalis mangrove ecosystem, Riau, Indonesia remains limited. This study aimed to

evaluate the potential of 25 PSB from the Bengkalis mangrove ecosystem as biofertilizer candidates by assessing their cellulolytic activity, potassium-solubilizing ability, indole-3-acetic acid (IAA) production, nitrogen-fixing ability, plant safety test, and plant growth-promoting effects on maize (*Zea mays* L.). The results showed that 12 isolates exhibited cellulolytic activity, 10 isolates were capable of solubilizing potassium, 14 isolates showed nitrogen-fixing ability, and all isolates produced IAA at varying concentrations. Based on a scoring approach integrating multiple plant growth promoting traits, isolate SMK 2.1 showed the highest potential, followed by MA 2.3, SMB 2.1, and RA 1.2 as promising isolates. In the maize growth assay at 7 days after planting, isolate SMK 2.1 was identified as the most promising isolate, producing the highest fresh weight (0.94 ± 0.21 g), root length (7.72 ± 3.21 cm), and shoot length (19.50 ± 5.27 cm) among all treatments. In addition, all isolates showed negative results in the plant safety test. Although the evaluation was limited to the early growth stage, these findings demonstrate that PSB isolated from the Bengkalis mangrove ecosystem have considerable potential as biofertilizer candidates and represent valuable indigenous microbial resources for sustainable agriculture.

Key words: Biofertilizer, indole-3-acetic acid, mangrove ecosystem, phosphate-solubilizing bacteria, plant growth-promoting bacteria

PENDAHULUAN

Jagung (*Zea mays* L.) merupakan salah satu komoditas pangan strategis di Indonesia (Muhiddin, 2025), namun produktivitas nasionalnya belum mampu memenuhi kebutuhan dalam negeri, sehingga impor meningkat sementara ekspor menurun. Impor jagung segar melonjak hingga 860,94 ribu ton (USD 232,36 juta), naik 125,11%, sedangkan jagung olahan mencapai 142,16 ribu ton (USD 62,7 juta) (Komalasari, 2023). Di Provinsi Riau, produktivitas jagung juga rendah, dengan luas panen 327,17 hektar, produktivitas 34,83 kuintal/hektar, dan total produksi 1.139,41 ton (BPS, 2024). Salah satu tantangan utamanya adalah dominasi lahan gambut yang bersifat masam, miskin hara, serta memiliki kendala fisik dan kimia yang membatasi pertumbuhan tanaman tanpa pengelolaan yang tepat (Pratama & Hernowo, 2025).

Peningkatan produktivitas jagung umumnya mengandalkan pupuk kimia, namun penggunaannya secara berlebihan dapat menurunkan kualitas tanah dan mengganggu mikroorganisme penting bagi

kesuburan tanah (Rahmawati *et al.*, 2022; Sulaeman *et al.*, 2024). Pupuk hayati berbasis mikroorganisme lokal menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan, salah satunya Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) yang memacu pertumbuhan tanaman melalui pelarutan unsur hara, penambahan nitrogen, produksi fitohormon, dan perlindungan terhadap patogen. Bakteri pelarut fosfat (BPF), sebagai bagian dari PGPB, berpotensi dikembangkan sebagai biofertilizer multifungsi (Boubekri *et al.*, 2021), dan terbukti mampu meningkatkan kesuburan tanah serta pertumbuhan tanaman, baik pada tanah mineral maupun gambut (Setiawati *et al.*, 2021).

Ekosistem mangrove dan lahan gambut di Riau memiliki karakteristik lingkungan yang relatif serupa, yaitu kondisi masam, kaya bahan organik, dan cenderung jenuh air, yang mendorong seleksi mikroba adaptif terhadap kondisi masam serta mendukung keragaman aktivitas metabolisme mikroorganisme asal mangrove (Farhan *et al.*, 2025; Kholifi *et al.*, 2021). Kondisi ini menjadikan bakteri asal mangrove berpotensi tetap aktif saat diaplikasikan

pada lahan gambut. Penelitian sebelumnya berhasil mengisolasi 25 BPF dari ekosistem mangrove Bengkalis, Riau yang menunjukkan karakteristik sebagai kandidat agen biofertilizer (Tiara, 2025), mengindikasikan potensi mangrove sebagai sumber mikroorganisme untuk mendukung pertumbuhan tanaman di lahan marginal.

BPF dilaporkan berpotensi sebagai pemacu pertumbuhan tanaman (Suleimanova *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2025), namun potensi multifungsi isolat BPF asal mangrove Bengkalis belum diketahui karena kajian sebelumnya terbatas pada uji pelarutan fosfat saja. Kemampuan fungsional lain seperti aktivitas selulolitik, pelarutan kalium, produksi IAA, penambatan nitrogen, serta kemampuan memacu pertumbuhan tanaman belum dievaluasi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan dengan pendekatan skrining multifungsi untuk mengkarakterisasi isolat BPF Bengkalis sebagai kandidat PGPB, disertai uji pemacuan pertumbuhan jagung dan evaluasi keamanan tanaman sebagai bagian dari seleksi kelayakan biofertilizer.

Penelitian ini menghipotesiskan bahwa isolat BPF asal mangrove Bengkalis memiliki kemampuan multifungsi dalam memacu pertumbuhan tanaman melalui kombinasi peningkatan ketersediaan hara dan produksi fitohormon, sehingga meningkatkan pertumbuhan awal jagung. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi potensi multifungsi isolat BPF tersebut melalui uji aktivitas selulolitik, pelarutan kalium, produksi IAA, dan penambatan nitrogen, serta menyeleksi isolat potensial melalui uji pemacuan pertumbuhan jagung dan uji keamanan tanaman. Hasilnya diharapkan menjadi dasar pengembangan biofertilizer berbasis bakteri lokal untuk mendukung

pertumbuhan jagung, khususnya di lahan gambut.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2025 hingga Mei 2026 di Laboratorium Mikrobiologi dan Bioproses serta Laboratorium Genetika dan Biomolekuler, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau. Bahan utama yang digunakan adalah 25 isolat BPF asal ekosistem mangrove Desa Kelapa Pati, Kabupaten Bengkalis, serta benih jagung varietas Paragon, medium *Nutrient Agar* (NA), medium *Nutrient Broth* (NB), medium Pikovskya, medium Pikovskaya cair, medium *Congo Red Cellulose Agar* (CCRA), medium *Alexandrov Agar*, medium *Nitrogen Free Bromothymol Blue* (NFB), medium Magnavaca. Peralatan yang digunakan meliputi peralatan mikrobiologi dan analisis laboratorium, seperti autoklaf (GEA), inkubator (Heraeus), *shaker incubator* (LabTech), spektrofotometer UV-Vis (Maskot), sentrifuge, mikroskop (Olympus), dan alat ukur pertumbuhan tanaman.

Uji selulolitik

Uji kemampuan selulolitik isolat uji dilakukan dengan menginokulasikan satu ose isolat ke medium CCRA (Hendricks *et al.*, 1995), kemudian diinkubasi pada suhu ruang selama tujuh hari. Aktivitas selulolitik ditandai dengan terbentuknya zona bening di sekeliling koloni yang kemudian diperjelas menggunakan larutan NaCl 2 M (Cavalcante *et al.*, 2024). Kemampuan selulolitik dievaluasi berdasarkan indeks selulolitik (IS) dengan kategori rendah ($IS < 1$), sedang ($IS 1-2$), dan tinggi ($IS > 2$). Indeks selulolitik dihitung menggunakan rumus (Triani *et al.*, 2024):

$$(IS) = \frac{\text{Diameter zona bening-Diameter koloni}}{\text{Diameter koloni}}$$

Uji Pelarut Kalium

Kemampuan isolat BPF dalam melarutkan kalium dianalisis menggunakan medium Aleksandrov dengan metode difusi kertas cakram (Fatharani & Rahayu, 2018). Sebanyak 10 µL inokulum bakteri diinokulasikan pada kertas cakram steril yang sebelumnya telah diletakkan di atas medium agar. Kultur selanjutnya diinkubasi pada suhu ruang selama 7 hari (Boubekri *et al.*, 2021). Aktivitas pelarutan kalium ditandai dengan terbentuknya zona bening di sekitar kertas cakram yang kemudian diukur untuk menghitung indeks kelarutan kalium (IK) berdasarkan rumus sebagai berikut (Damayanti *et al.*, 2023):

$$IK = \frac{\text{Diameter zona bening}}{\text{Diameter koloni}}$$

Uji produksi IAA

Produksi IAA oleh isolat uji dianalisis dengan cara menginokulasikan 20% kultur BPF ke dalam medium Pikovskaya cair dengan dan tanpa diperkaya dengan L-triptofan (100 µg/mL), kemudian diinkubasi selama 3 hari, pada suhu ruang. Setelah masa inkubasi, kultur disentrifugasi dan supernatan direaksikan dengan reagen Salkowski untuk diukur absorbansinya pada panjang gelombang 530 nm (Gordon & Weber, 1951). Konsentrasi IAA dihitung berdasarkan kurva standar yang dibuat menggunakan larutan IAA sintetis dalam rentang konsentrasi 0-50 ppm (Mogea *et al.*, 2022; Patten & Glick, 2002).

Uji penambat nitrogen

Kemampuan isolat uji dalam penambatan nitrogen diuji dengan menginokulasikan 1

mL kultur BPF ke dalam 9 mL medium NFB semi-padat, kemudian diinkubasi pada suhu ruang selama 7 hari. Isolat dinyatakan positif apabila terjadi perubahan warna medium dari hijau kekuningan menjadi biru serta terbentuk pelikel pada permukaan medium (Ekowati *et al.*, 2021).

Uji Pemacu Pertumbuhan Jagung

Uji kemampuan isolat BPF sebagai pemacu pertumbuhan jagung menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri atas lima perlakuan, yaitu kontrol dan empat isolat BPF terbaik, masing-masing dengan empat ulangan sehingga diperoleh 20 unit percobaan. Inokulum bakteri disiapkan dengan menginokulasi 1 mL isolat BPF dari medium NB ke dalam 9 mL medium Pikovskaya cair. Kultur diinkubasi menggunakan shaker orbital pada 150 rpm selama 72 jam pada suhu ruang. Kepadatan suspensi inokulum disesuaikan dengan standar McFarland 0,5 ($\approx 1,5 \times 10^8$ CFU/mL) sebelum digunakan sebagai inokulum pada pengujian pemacuan pertumbuhan jagung. Benih jagung disterilisasi permukaan agar diperoleh kecambah seragam dan bebas kontaminan (Dey *et al.*, 2004; ISTA, 2019). Kecambah kemudian direndam dalam suspensi BPF selama 2 jam untuk kolonisasi awal bakteri pada permukaan akar, selanjutnya dipindahkan ke dalam botol berisi 15 mL medium Magnavaca semi-padat steril. Waktu pemindahan kecambah ke medium ditetapkan sebagai hari setelah tanam (HST). Setelah 48 jam, setiap kecambah diinokulasi kembali dengan 100 µL kultur BPF terseleksi, sedangkan kontrol diberi medium tanpa bakteri. Seluruh perlakuan kemudian diinkubasi hingga umur 7 HST pada fotoperiode 16 jam terang dan 8 jam gelap (Rekha *et al.*, 2007). Setelah masa inkubasi, tanaman dipanen, dibersihkan,

dilakukan pengukuran parameter pertumbuhan meliputi panjang tajuk, panjang akar, jumlah daun, jumlah akar, berat segar dan berat kering tanaman (Latuharhary & Saputro, 2017; Sommer *et al.*, 2024). Pengukuran panjang menggunakan penggaris, sedangkan berat kering tanaman diperoleh setelah pengeringan sampel pada suhu 105°C hingga berat konstan. Selama pengujian pemacuan pertumbuhan tanaman, keamanan isolat terhadap tanaman juga dievaluasi secara bersamaan. Pengamatan dilakukan sejak inokulasi hingga akhir masa inkubasi dengan mengamati munculnya gejala yang mengindikasikan patogenisitas, seperti nekrosis, klorosis, pembusukan, atau kematian kecambah. Isolat yang tidak menimbulkan gejala tersebut dinyatakan tidak bersifat patogen terhadap tanaman jagung.

Analisis data

Data hasil karakterisasi kemampuan pemacu pertumbuhan tanaman isolat BPF dianalisis secara deskriptif. Nilai IS dan IK dikelompokkan secara deskriptif ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi berdasarkan pembagian rentang nilai hasil pengukuran menjadi tiga interval yang sama. Pengelompokan tersebut digunakan untuk memudahkan interpretasi kemampuan relatif antar isolat dan tidak digunakan sebagai dasar analisis statistik. Selanjutnya, data karakter fungsional isolat digunakan sebagai dasar seleksi isolat potensial melalui sistem skoring. Seluruh parameter diberi bobot yang sama, dengan skor 3, 2, dan 1 masing-masing diberikan pada kategori tinggi, sedang, dan rendah, sedangkan skor 0 diberikan pada isolat yang tidak menunjukkan aktivitas. Total skor digunakan untuk menentukan isolat paling potensial

sebagai kandidat biofertilizer. Data hasil uji pemacuan pertumbuhan jagung dianalisis menggunakan analisis ragam (*One-Way Analysis of Variance/ANOVA*). Apabila terdapat pengaruh yang signifikan antar perlakuan, analisis dilanjutkan dengan uji Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 16.0.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivitas Selulolitik dari Isolat BPF

Sebanyak 25 BPF asal ekosistem mangrove Bengkalis, Riau diseleksi kemampuannya dalam mendegradasi selulosa menggunakan medium CCRA. Sebanyak 12 isolat mampu membentuk zona bening di sekitar koloni, yang mengindikasikan adanya aktivitas selulolitik (Tabel 1). Sebagian besar isolat menunjukkan aktivitas selulolitik yang rendah dengan nilai IS $<1,0$. Sebaliknya, isolat SMB 2.1 dan SMK 2.1 memiliki aktivitas selulolitik tertinggi dengan nilai IS masing-masing sebesar $4,8 \pm 0,4$ dan $2,6 \pm 0,9$, sehingga dikategorikan sebagai isolat dengan aktivitas selulolitik dengan kategori tinggi dan sedang.

Tingginya nilai IS pada isolat SMB 2.1 menunjukkan indikasi kemampuan yang lebih baik dalam menghasilkan dan menyekresikan enzim selulase. Hal tersebut ditunjukkan oleh terbentuknya zona hidrolisis yang lebih luas dibandingkan dengan isolat lainnya (Bautista-Cruz *et al.*, 2024). Aktivitas selulolitik bakteri berperan penting dalam proses dekomposisi bahan organik melalui hidrolisis selulosa menjadi senyawa yang lebih sederhana. Kemampuan ini berkaitan dengan produksi enzim selulase, seperti endoglukanase, ekso-

glukanase, dan β -glukosidase (Xu *et al.*, 2026), yang bekerja secara sinergis untuk menguraikan selulosa. Dengan demikian, isolat yang memiliki nilai IS tinggi berpotensi

berkontribusi pada percepatan daur ulang karbon dan mineralisasi nutrisi di lingkungan.

Tabel 1. Indeks selulolitik isolat bakteri ekosistem mangrove Bengkalis

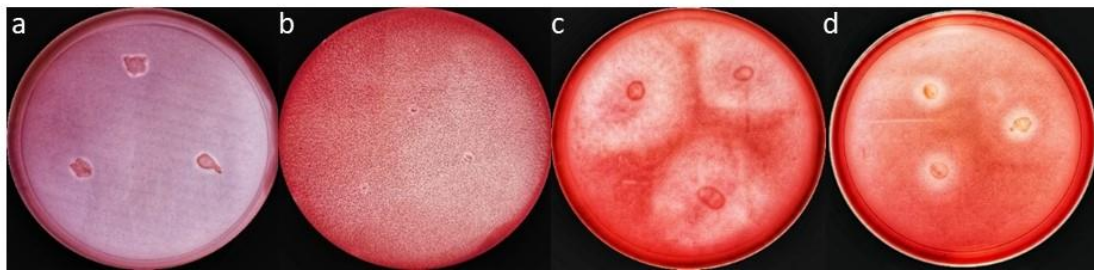
Kode Isolat	IS $\pm$ SD	Kategori
MA 2.2	0,4 $\pm$ 0,1	Rendah
MA 3.1	0,5 $\pm$ 0,4	Rendah
SMB 1.1	0,2 $\pm$ 0,1	Rendah
SMB 1.2	0,6 $\pm$ 0,2	Rendah
SMB 2.1	4,8 $\pm$ 0,4	Tinggi
SMK 2.1	2,6 $\pm$ 0,9	Sedang
SMB 3.1	0,2 $\pm$ 0,0	Rendah
SMB 3.3	0,1 $\pm$ 0,1	Rendah
SMB 3.4	0,3 $\pm$ 0,1	Rendah
RA 1.1	0,4 $\pm$ 0,1	Rendah
RA 2.2	0,3 $\pm$ 0,1	Rendah
EA 1.1	0,2 $\pm$ 0,0	Rendah

Keterangan: IS (Indeks Selulolitik), SD (Standar Deviasi)

Nilai IS tertinggi yang diperoleh pada penelitian ini masih lebih rendah dibandingkan dengan yang dilaporkan oleh Aisah & Zul (2026), yaitu sebesar $10,8 \pm 0,6$, tetapi lebih tinggi dibandingkan dengan aktivitas selulolitik bakteri mangrove yang dilaporkan oleh Dewiyanti *et al.* (2023), yaitu berkisar antara 0,07–0,80. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik isolat, habitat asal, serta metode pengujian yang digunakan. Aisah & Zul (2026) menggunakan isolat bakteri dengan aktivitas selulolitik yang telah terseleksi sehingga menghasilkan nilai IS yang lebih tinggi, sedangkan Dewiyanti *et al.* (2023) mengevaluasi isolat dari ekosistem mangrove Aceh dengan karakteristik lingkungan dan komunitas mikroba yang berbeda. Selain itu, perbedaan komposisi medium dan jenis substrat selulosa yang digunakan dalam pengujian juga dapat

memengaruhi pembentukan zona bening dan nilai indeks selulolitik yang dihasilkan.

Ekosistem mangrove merupakan habitat yang kaya akan biomassa lignoselulosa dari serasah daun, akar, dan jaringan tumbuhan (Utami *et al.*, 2024), sehingga menjadi sumber mikroorganisme yang memiliki kemampuan degradasi bahan organik. Oleh karena itu, tingginya aktivitas selulolitik pada isolat SMB 2.1 diduga merupakan bentuk adaptasi terhadap lingkungan mangrove yang kaya substrat selulosa (Aisah & Zul, 2026; Gatpatan *et al.*, 2024). Pada penelitian ini, penggunaan medium CCRA yang mengandung selulosa kristalin memungkinkan seleksi isolat dengan kemampuan degradasi selulosa yang lebih efektif, yang ditunjukkan oleh terbentuknya zona bening di sekitar koloni bakteri (Gambar 1) (Kafle *et al.*, 2015).



Gambar 1. Aktivitas selulolitik oleh isolat bakteri ekosistem mangrove bengkalis pada medium CCRA pH 6, inkubasi pada suhu ruang selama 7 hari. (a) Isolat MA 2.2 (b) Isolat MA 3.1 (c) Isolat SMB 2.1 (d) Isolat SMK 2.1.

Aktivitas Pelarut Kalium dari Isolat BPF

Sebanyak 10 isolat mampu melarutkan kalium (Tabel 2), dengan kemampuan pelarutan kalium pada kategori rendah, sedang, dan tinggi. Isolat MA 2.3, SMK 2.1, dan RA 1.2 menunjukkan aktivitas pelarutan kalium pada kategori tinggi. Sebaliknya, nilai IK terendah ditemukan pada isolat EA 3.1 yang diikuti oleh SMB 3.4. Sementara itu, lima isolat lainnya, yaitu SMB 1.1, SMB 1.2, SMB 2.2, SMB 3.2, dan SMB 3.3, menunjukkan nilai IK berkisar antara 1,4-1,5 yang termasuk kategori sedang. Variasi nilai IK menunjukkan adanya perbedaan kemampuan antar isolat dalam melarutkan kalium dari sumber mineral yang tidak tersedia bagi tanaman.

Perbedaan kemampuan pelarutan kalium antar isolat diduga berkaitan dengan variasi kapasitas metabolik dalam menghasilkan asam-asam organik, seperti asam sitrat, oksalat, dan glukonat, yang berperan dalam melarutkan mineral pembawa kalium melalui proses asidolisis, kompleksasi, dan pertukaran ion (Yadav, 2022). Mekanisme tersebut menyebabkan pelepasan ion K^+ dari mineral silikat sehingga lebih mudah diserap oleh tanaman. Terbentuknya zona bening di sekitar koloni pada medium Alexandrov (Gambar 2) merupakan indikasi terjadinya proses pelarutan mineral kalium akibat aktivitas metabolik bakteri (Gao *et al.*, 2025).

Nilai IK yang diperoleh pada penelitian ini

tergolong sedang dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Anderson *et al.* (2025) melaporkan nilai IK berkisar antara 0,77-2,20 pada bakteri rizosfer akasia yang diuji menggunakan sumber kalium berupa *potassium aluminosilicate*. Sementara itu, Istiyova & Santosa (2023) memperoleh nilai IK yang lebih tinggi, yaitu 1,4-5,3, menggunakan sumber kalium K_2HPO_4 . Perbedaan hasil antar penelitian dapat dipengaruhi oleh karakteristik genetik isolat, kondisi lingkungan asal, komposisi medium, serta jenis mineral kalium yang digunakan selama proses skrining (Jaya *et al.*, 2021).

Nilai IK yang diperoleh relatif moderat, beberapa isolat menunjukkan potensi yang menjanjikan sebagai bakteri pemacu pertumbuhan tanaman. Menariknya, isolat SMK 2.1 tidak hanya memiliki kemampuan pelarutan kalium yang tinggi, tetapi juga menunjukkan aktivitas selulolitik yang tinggi pada pengujian sebelumnya. Karakter multifungsi tersebut menunjukkan bahwa isolat SMK 2.1 berpotensi mendukung pertumbuhan tanaman melalui beberapa mekanisme sekaligus, yaitu meningkatkan ketersediaan kalium dan mempercepat dekomposisi bahan organik.

Kemampuan Isolat BPF Memproduksi IAA

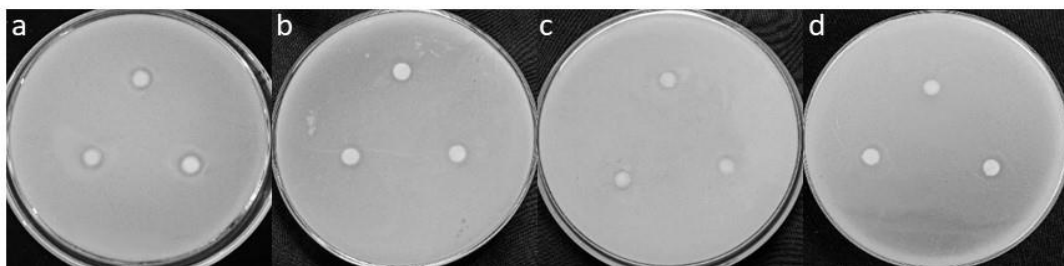
Produksi IAA oleh isolat uji menunjukkan variasi yang cukup besar baik pada media tanpa maupun dengan penambahan L-triptofan (Gambar 3). Penambahan L-triptofan pada medium meningkatkan produksi IAA pada hampir seluruh isolat berkisar sekitar 1,2–2 kali dibandingkan perlakuan tanpa L-triptofan. Meskipun demikian, beberapa isolat tetap mampu menghasilkan IAA dalam jumlah relatif tinggi

tanpa penambahan L-triptofan. Pada media tanpa L-triptofan (Gambar 3A), produksi IAA relatif rendah hingga sedang. Produksi IAA tertinggi pada kondisi ini ditunjukkan oleh isolat SMB 2.2, diikuti oleh SMB 3.3, SMB 3.2, dan SMB 3.1. Sebaliknya, beberapa isolat seperti MA 2.2, MA 2.3, dan EA 3.1 menghasilkan IAA dalam jumlah relatif rendah ketika ditumbuhkan tanpa penambahan prekursor

Tabel 2. Indeks kelarutan kalium isolat bakteri ekosistem mangrove Bengkalis

Kode isolat	IK $\pm$ SD	Keterangan
MA 2.3	1,7 $\pm$ 0,1	Tinggi
SMB 1.1	1,5 $\pm$ 0,0	Sedang
SMB 1.2	1,4 $\pm$ 0,1	Sedang
SMB 2.2	1,5 $\pm$ 0,1	Sedang
SMK 2.1	1,7 $\pm$ 0,1	Tinggi
SMB 3.2	1,4 $\pm$ 0,2	Sedang
SMB 3.3	1,4 $\pm$ 0,1	Sedang
SMB 3.4	1,3 $\pm$ 0,1	Rendah
RA 1.2	1,6 $\pm$ 0,1	Tinggi
EA 3.1	1,2 $\pm$ 0,0	Rendah

Keterangan: IK (Indeks Kelarutan Kalium), SD (Standar Deviasi)



Gambar 2. Aktivitas pelarutan kalium oleh isolat bakteri ekosistem mangrove Bengkalis pada medium Alexandrov pH 6, dengan inkubasi pada suhu ruang selama 7 hari. (a) Isolat MA 2.3 (b) Isolat SMB 1.1 (c) Isolat SMB 1.2 (d) Isolat SMB 2.2.

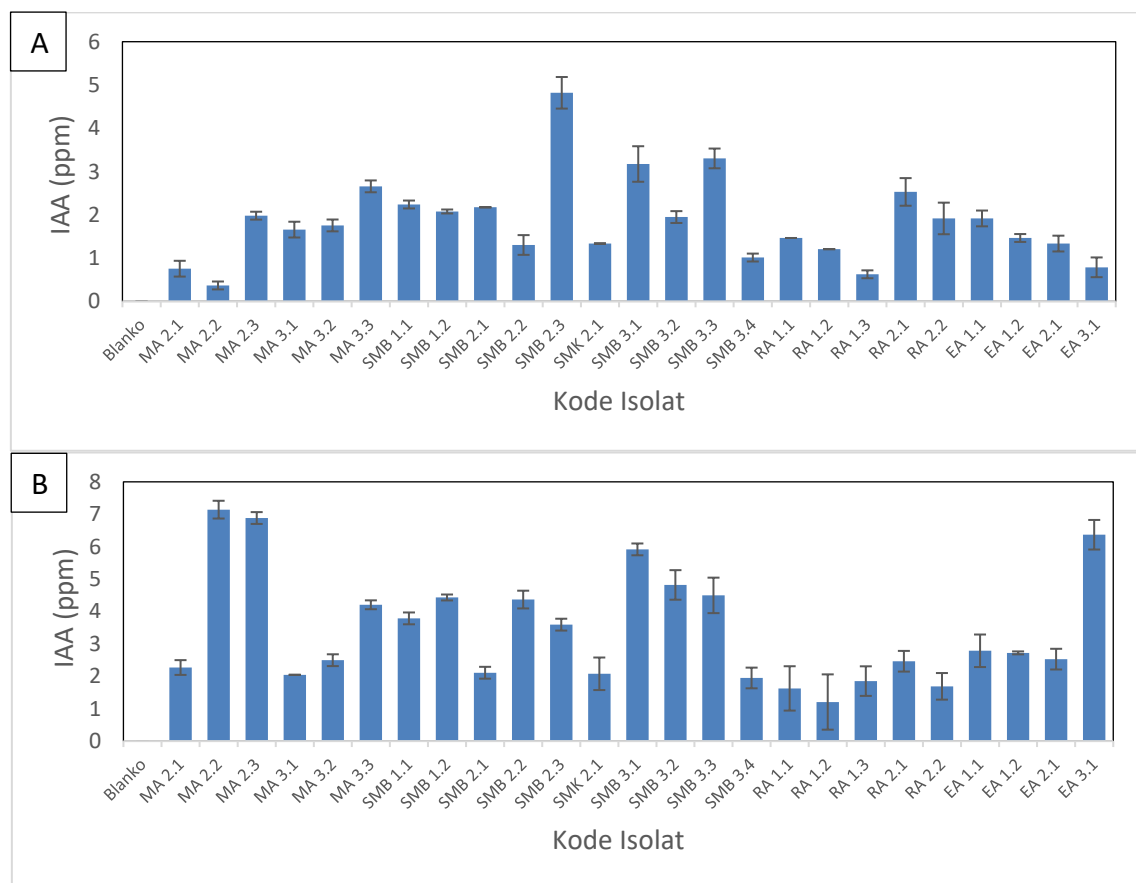
Penambahan L-triptofan meningkatkan produksi IAA pada hampir seluruh isolat yang diuji (Gambar 3B). Peningkatan paling menonjol terlihat pada isolat MA 2.2, MA 2.3, SMB 3.2, SMB 3.3, dan EA 3.1. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar isolat memanfaatkan jalur biosintesis IAA yang bergantung pada triptofan (*tryptophan-dependent pathway*), di mana L-triptofan berfungsi sebagai prekursor utama dalam

pembentukan IAA. Temuan ini sejalan dengan laporan Liu *et al.*, (2019) yang menyatakan bahwa ketersediaan triptofan dapat meningkatkan aktivitas jalur biosintesis IAA pada berbagai bakteri pemacu pertumbuhan tanaman. Isolat seperti SMB 2.2, SMB 3.1, dan SMB 3.3 tetap mampu menghasilkan IAA dalam jumlah relatif tinggi meskipun tanpa penambahan L-triptofan. Hal tersebut mengindikasikan

bahwa isolat-isolat uji memiliki efisiensi biosintesis IAA yang lebih baik atau kemungkinan memanfaatkan sumber triptofan endogen maupun jalur metabolisme alternatif sebagaimana dilaporkan oleh Ahmad *et al.*, (2020).

Variasi produksi IAA antar isolat diduga berkaitan dengan perbedaan karakter genetik, kapasitas metabolik, serta kemampuan adaptasi masing-masing bakteri terhadap lingkungan mangrove yang dinamis (Özdağ *et al.*, 2016). Keragaman tersebut juga telah dilaporkan pada berbagai bakteri yang

diisolasi dari ekosistem mangrove dan habitat pesisir lainnya (Fatimah *et al.*, 2022; Pohan *et al.*, 2024). Produksi IAA merupakan salah satu mekanisme utama PGPR, karena berperan dalam merangsang pembentukan akar lateral, meningkatkan perkembangan rambut akar, dan memperluas daerah serapan hara. Isolat yang menunjukkan produksi IAA tinggi, terutama MA 2.2, MA 2.3, SMB 3.2, SMB 3.3, dan EA 3.1, berpotensi memacu pertumbuhan tanaman melalui peningkatan perkembangan sistem perakaran.



Gambar 3. Produksi IAA isolat uji, (A) Tanpa L-Triptofan, (B) L-Triptofan

Aktivitas Penambat Nitrogen Isolat BPF

Hasil uji aktivitas fiksasi nitrogen ditentukan berdasarkan perubahan warna medium dan pembentukan pelikel (Tabel 3).

Sebanyak 20 isolat membentuk pelikel dan 14 isolat menunjukkan perubahan warna pada medium. Sebanyak 14 isolat, yaitu MA 2.1, MA 2.3, MA 3.1, MA 3.2, SMB 2.1, SMB

2.3, SMB 3.1, SMB 3.4, RA 1.1, RA 1.2, RA 2.2, EA 1.1, EA 2.1, dan EA 3.1, menunjukkan kemampuan membentuk pelikel serta perubahan warna medium, sehingga diduga memiliki kemampuan fiksasi nitrogen yang lebih baik dibandingkan isolat lainnya.

Sebaliknya, beberapa isolat hanya membentuk pelikel tanpa disertai perubahan warna medium, yang mengindikasikan bahwa kemampuan tumbuh pada medium bebas nitrogen tidak selalu diikuti oleh aktivitas fiksasi nitrogen yang tinggi. Perubahan warna medium dari kuning menjadi biru menunjukkan peningkatan pH akibat akumulasi amonia atau ion amonium yang dihasilkan selama proses penambatan nitrogen (Córdova-Rodríguez *et al.*, 2022). Sementara itu, pembentukan pelikel pada permukaan medium mengindikasikan pertumbuhan bakteri pada kondisi mikroaerofilik yang mendukung aktivitas enzim nitrogenase, enzim utama yang berperan dalam proses fiksasi nitrogen (Golub & Overton, 2021).

Tingginya proporsi isolat yang menunjukkan hasil positif mengindikasikan bahwa ekosistem mangrove merupakan

habitat yang potensial bagi bakteri penambat nitrogen. Kondisi mangrove yang umumnya memiliki pH relatif rendah, kandungan bahan organik tinggi, dan ketersediaan nitrogen anorganik yang terbatas mendukung berkembangnya mikroorganisme yang mampu memanfaatkan nitrogen atmosfer (N_2) sebagai sumber nitrogen alternatif (Wang *et al.*, 2024). Karakteristik tersebut juga dijumpai pada ekosistem mangrove Bengkalis yang didominasi oleh sedimen organik, dipengaruhi oleh pasang surut, dan pH rendah (Aisah & Zul 2026), sehingga menyediakan relung yang sesuai bagi pertumbuhan bakteri diazotrof. Kondisi lingkungan tersebut diduga berkontribusi terhadap tingginya proporsi isolat yang menunjukkan kemampuan penambatan nitrogen pada penelitian ini. Hal ini didukung oleh berbagai penelitian yang berhasil mengisolasi sejumlah besar bakteri diazotrof dari sedimen, rizosfer, maupun jaringan tanaman mangrove, seperti penelitian di kawasan Sundarbans, India, yang memperoleh 235 isolat diazotrof heterotrofik (Luo *et al.*, 2021).

Tabel 3. Kemampuan penambatan nitrogen isolat bakteri asal ekosistem mangrove Bengkalis

Kode Isolat	Pelikel	Perubahan Warna Media	Kode Isolat	Pelikel	Perubahan Warna Media	Kode Isolat	Pelikel	Perubahan Warna Media
MA 2.1	+	+	SMB 2.2	+	-	RA 1.2	+	+
MA 2.2	+	-	SMB 2.3	+	+	RA 1.3	+	-
MA 2.3	+	+	SMK 2.1	-	-	RA 2.1	+	-
MA 3.1	+	+	SMB 3.1	+	+	RA 2.2	+	+
MA 3.2	+	+	SMB 3.2	+	-	EA 1.1	+	+
MA 3.3	-	-	SMB 3.3	+	-	EA 1.2	-	-
SMB 1.1	-	-	SMB 3.4	+	+	EA 2.1	+	+
SMB 1.2	+	-	RA 1.1	+	+	EA 3.1	+	+

Ket: (-) tidak menunjukkan aktivitas

Kemampuan fiksasi nitrogen merupakan salah satu karakter utama bakteri pemacu pertumbuhan tanaman karena dapat

meningkatkan ketersediaan nitrogen di daerah perakaran dan mengurangi ketergantungan tanaman pada pupuk

nitrogen sintetis (Singh *et al.*, 2021). Menariknya, beberapa isolat yang menunjukkan indikasi positif pada uji fiksasi nitrogen, seperti MA 2.3, SMB 2.1, dan RA 1.2, juga memiliki karakter fungsional lain yang telah teridentifikasi dalam penelitian ini, termasuk pelarutan fosfat, pelarutan kalium, aktivitas selulolitik, dan produksi IAA

Pemacuan pertumbuhan jagung

Data hasil pengujian yang meliputi IS, IK, produksi IAA, kemampuan penambatan nitrogen dan uji keamanan tanaman yang negatif digunakan sebagai dasar dalam proses skoring untuk menentukan isolat bakteri yang paling potensial sebagai kandidat PGPR. Hasil skoring menunjukkan bahwa isolat bakteri asal ekosistem mangrove Bengkalis memiliki potensi yang bervariasi. Isolat SMK 2.1 memperoleh skor tertinggi, yaitu 11, diikuti oleh isolat MA 2.3, SMB 2.1, dan RA 1.2 dengan skor masing-masing 10. Berdasarkan hasil skoring,

keempat isolat tersebut dipilih untuk pengujian lanjutan sebagai kandidat biofertilizer pada tanaman jagung.

Hasil uji pemacuan pertumbuhan tanaman jagung menunjukkan bahwa setiap isolat PGPR memiliki kemampuan yang berbeda dalam meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman. Variasi respons pertumbuhan yang diamati diduga berkaitan dengan perbedaan karakter fisiologis dan metabolik masing-masing isolat, termasuk kemampuan menghasilkan senyawa pemacu pertumbuhan seperti IAA, meningkatkan ketersediaan unsur hara melalui pelarutan kalium dan penambatan nitrogen, membentuk biofilm, serta beradaptasi terhadap kondisi lingkungan perakaran (Astiani *et al.*, 2024). Perbedaan kemampuan tersebut berkontribusi terhadap variasi efektivitas isolat dalam mendukung pertumbuhan tanaman jagung, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Morfologi tanaman jagung umur 7 HST pada perlakuan berbagai isolat bakteri pelarut fosfat, (K) kontrol, (P1) MA 2.3, (P2) SMB 2.1, (P3) SMK 2.1, (P4) RA 1.2

Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap isolat bakteri memberikan respons yang berbeda terhadap pertumbuhan

tanaman jagung umur 7 HST (Tabel 4). Perbedaan tersebut diduga berkaitan dengan karakter fungsional PGPR yang

dimiliki masing-masing isolat, seperti kemampuan menghasilkan IAA, melarutkan fosfat dan kalium, menambat nitrogen, serta aktivitas selulolitik (Song *et al.*, 2023). Secara umum, beberapa isolat mampu

meningkatkan pertumbuhan tanaman dibandingkan kontrol, meskipun tidak seluruh parameter menunjukkan perbedaan yang signifikan.

Tabel 4. Pertumbuhan tanaman jagung umur 7 hari setelah tanam pada medium magnavaca yang diinokulasi dengan isolat terseleksi

Parameter pengamatan	Perlakuan				
	Kontrol	MA 2.3	SMB 2.1	SMK 2.1	RA 1.2
Rerata berat segar (g)	0,49±0,14 ^b	0,52±0,08 ^b	0,60±0,22 ^b	0,94±0,21 ^a	0,53±0,27 ^b
Rerata berat kering (g)	0,06±0,01 ^{ab}	0,08±0,02 ^{ab}	0,08±0,02 ^a	0,08±0,01 ^{ab}	0,06±0,01 ^b
Rerata panjang tajuk (cm)	15,66±1,96 ^{ab}	13,84±2,13 ^b	17,7±1,93 ^{ab}	19,5±5,27 ^a	14,68±2,03 ^b
Rerata jumlah daun	2,8±0,44 ^{ns}	2,6±0,55 ^{ns}	3,0±0,0 ^{ns}	3,0±0,71 ^{ns}	2,8±0,45 ^{ns}
Rerata panjang akar (cm)	4,55±1,95 ^b	5,1±0,72 ^{ab}	5,48±1,46 ^{ab}	7,72±3,21 ^a	5,56±2,4 ^{ab}
Rerata jumlah akar	10,4±3,85 ^{ns}	13,6±3,91 ^{ns}	12,0±2,55 ^{ns}	9,0±3,08 ^{ns}	9,0±3,32 ^{ns}

Keterangan: ns = non-signifikan; notasi yang berbeda pada baris yang sama adalah signifikan pada taraf 5% kepercayaan

Isolat SMK 2.1 menunjukkan hasil terbaik dengan berat segar ($0,94 \pm 0,21$ g), panjang tajuk ($19,5 \pm 5,27$ cm), dan panjang akar ($7,72 \pm 3,21$ cm) tertinggi, sementara SMB 2.1 unggul pada berat kering dan MA 2.3 pada jumlah akar terbanyak. Respons terbaik SMK 2.1 diduga berkaitan dengan sinergi kemampuannya melarutkan fosfat dan kalium, menghasilkan IAA, serta aktivitas selulolitik, sejalan dengan temuan bahwa PGPR dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara, merangsang sistem perakaran, dan memproduksi zat pengatur tumbuh (Cervantes-Vázquez *et al.*, 2021). Namun, pengaruh terhadap biomassa kering belum optimal karena pengamatan dilakukan pada umur 7 HST yang masih tergolong fase awal pertumbuhan.

Parameter jumlah daun dan jumlah akar tidak berbeda nyata antar perlakuan,

mengindikasikan bahwa pada fase awal pertumbuhan, perkembangan tanaman masih dipengaruhi faktor genetik dan cadangan nutrisi benih sehingga efek PGPR belum sepenuhnya terlihat, selain juga dipengaruhi kemampuan adaptasi dan kolonisasi bakteri pada rizosfer (Khoso *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2025). Secara keseluruhan, isolat SMK 2.1 menunjukkan potensi terbaik dalam meningkatkan pertumbuhan awal jagung, terutama pada berat segar, panjang tajuk, dan panjang akar, namun potensi ini masih perlu divalidasi pada fase pertumbuhan selanjutnya serta kondisi rumah kaca maupun lapangan.

SIMPULAN

Bakteri pelarut fosfat asal ekosistem mangrove Bengkalis menunjukkan karakter

pemacu pertumbuhan tanaman yang beragam, meliputi aktivitas selulolitik, pelarutan kalium, penambahan nitrogen, dan produksi IAA. Dari 25 isolat yang dievaluasi, beberapa isolat menunjukkan kemampuan multifungsi sebagai kandidat *plant growth-promoting bacteria* (PGPB), dengan isolat SMK 2.1, MA 2.3, SMB 2.1, dan RA 1.2 sebagai isolat potensial berdasarkan kombinasi karakter fungsional yang dimiliki. Aplikasi isolat terpilih pada tanaman jagung (*Zea mays* L.) menunjukkan peningkatan pertumbuhan awal tanaman, terutama pada perkembangan biomassa segar, tajuk, dan sistem perakaran, dengan isolat SMK 2.1 menunjukkan respons pertumbuhan terbaik. Selain itu, hasil uji keamanan tanaman menunjukkan bahwa isolat potensial tidak bersifat patogen terhadap tanaman jagung. Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa bakteri pelarut fosfat asal mangrove Bengkalis berpotensi sebagai sumber biofertilizer lokal untuk mendukung pertanian berkelanjutan, potensi tersebut masih bersifat awal karena pengujiannya terbatas pada fase awal pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, penelitian lanjutan melalui identifikasi molekuler, pengembangan formulasi, serta evaluasi pada kondisi rumah kaca dan lapangan diperlukan untuk memvalidasi efektivitas, stabilitas, dan konsistensi kinerja isolat sebagai agen hayati.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, E., Sharma, S. & Sharma, P. (2020). Deciphering operation of tyryptophan independent pathway in high model indole-3-acetic acid (IAA) producing *Micrococcus aloeverae* DCB-20. *FEMS Microbiology Letters*. 367(24):fnaa190. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnaa1>

90

Aisah, & Zul, D. (2026). Isolasi dan karakterisasi bakteri selulolitik dari hutan mangrove Bengkalis, Riau: potensi sebagai agen biofertilizer. *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 11(1), 12–26. <https://doi.org/10.24002/biota.v11i1.11824>

Anderson, R.S., Marwan, H. & Mulyati, S. (2025). Potensi *Bacillus* spp. dari rizosfer tanaman akasia sebagai agens hayati *Fusarium* sp. dan pemacu pertumbuhan tanaman. *Jurnal Agroecotania*, 8(2):104-117

Astiani, M., Sukmawati, S., Rahim, I., Yamin, M., & Suherman, S. (2024). Karakteristik dan analisis korelasi karakter fisiologis tanaman jagung hibrida (*Zea mays* L.) pada tanah bertekstur liat diperkaya pupuk slowrelease berbasis biochar. *Perbal: Jurnal Pertanian Berkelanjutan*. 12(2):154-163. <https://doi.org/10.30605/perbal.v12i2.3455>

Bautista-Cruz, A., Aquino-Bolaños, T., Hernández-Canseco, J., & Quiñones-Aguilar, E. (2024). Cellulolytic aerobic bacteria isolated from agricultural and forest Soils: An Overview. *Biology*, 13(2):102. <https://doi.org/10.3390/biology13020102>

Boubekri, K., Soumare, A., Mardad, I., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y. & Kouisni, L. (2021). The screening of potassium and phosphate solubilizing actinobacteria and the assesment of

- their ability to promote wheat growth parameters. *Microorganism*, 9(3):470. <https://doi.org/10.3390/microorganism9030470>
- BPS. (2024). *Luas Panen, Produksi, dan Produktivitas Padi Menurut Provinsi, 2024*.
- Cavalcante, F.G., Bandeira, L.L., Silva V.M.A., Rocha, I.F., Silva, A.O., Leite, L.O., Martins, C.M. & Martins, S.C.S. (2024). Relationship between cultivable bacterial abundance and soil C, N and P contents across a land use gradient in the Brazilian Cerrado. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(3):1-15. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-044>
- Cervantes-Vázquez, T., Valenzuela-García, A., Cervantes-Vázquez, M., Guzmán-Silos, T., Fortiz, E., Rangel, P., Rueda-Puente, E. (2021). Morphophysiological, enzymatic, and elemental activity in greenhouse tomato saladette seedlings from the effect of plant growth-promoting rhizobacteria. *Agronomy*, 11(5):1008. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051008>
- Cordova-Rodriguez, A., Rentería-Martínez, M.E., López-Miranda, M. E., Guzmán-Ortíz, J. M., & Moreno-Salazar, F. (2022). Simple and sensitive spectrophotometric method for estimating the nitrogen-fixing capacity of bacterial cultures. *MethodsX*, 9, 101917. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101917>
- Damayanti, R.E., Fenylestari, G. & Kusuma, A. B. (2023). Isolasi dan uji aktivitas Plant Growth Promoting Bacteria (PGPB) dari isolat lokal asal pupuk hayati majemuk Ricesolution PT. Archipelago Biotechnology Indonesia. *Biomaras: Journal of Life Science and Technology*, 1(1):42-48.
- Dewiyanti, I., Darmawi, D., Muchlisin, Z.A., Helmi, T.Z., Arisa, I.I., Rahmiati, R. & Destri, E. (2022). Cellulase enzyme activity of the bacteria isolated from mangrove ecosystem in Aceh Besar dan Banda Aceh. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science* 951(012113). doi:10.1088/1755-1315/951/1/012113
- Dey, R. Ā., Pal, K. K., Bhatt, D. M., & Chauhan, S. M. (2004). Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiology Research*, 159(4):371-394. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2004.08.004>
- Ekowati, C.N., Mirani, M., Handayani, K. & Agustrina, R. (2021). Detection of nitrogenase producing bacteria from the soil of Liwa Botanical Garden. *Jurnal Ilmiah Biologi Eksperimen dan Keanekaragaman Hayati*, 8(2):53-58. <https://doi.org/10.23960/jbekh.v8i2.204>
- Farhan, M., Rahma, N.P., Aulia, G.A., Asyura, Y. & Zilvina, B. (2025). Kajian perbedaan morfologi tanah antara lahan gambut dan lahan mineral di Riau Timur. *Psikosospes: Jurnal Psikososial dan Pendidikan*, 1(2):940-948.

- Fatharani, R & Rahayu, Y.S. (2018). Isolation and characterization of potassium solubilizing bacteria from paddy rhizosphere (*Oryza sativa* L). *Journal of Physics: Conference Series*, 1108(1):012105. IOP Publishing.
- Fatimah, Fadilah, R.L.A., Millah, A.I., Nurhariyati, T., Irawan, B., Ni'matuzzahroh., Affandi, M., Arni, Z., Widhiya, E.W., Salsabila, S. & Ramly, Z.A. (2022). Ability test of IAA (Indole-3-Acetic Acid) hormone-producing endophytic bacteria from Lamongan Mangrove. *Jurnal Riset Biologi dan Aplikasinya*, 4(1):42-50. <https://doi.org/10.26740/jrba.v4n1.p.42-50>
- Gao, J.N., Xu, M., & Uwiringiyimana, E. (2025). Isolation of highly efficient potassium solubilizing bacteria and their effects on nutrient acquisition and growth promotion in tobacco seedlings. *BMC Plant Biology*, 25(1):745. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06760-y>.
- Gatpatan, I. G. T., Cabulong, R. B., & Sadaba, R. B. (2024). Diversity and screening of cellulolytic microorganisms from mangrove forests, natural parks, paddy field, and sugarcane plantation in Panay Island, Philippines. *International Journal of Microbiology*, 1:5573158. <https://doi.org/10.1155/2024/5573158>
- Golub, S. R., & Overton, T. W. (2021). Pellicle formation by *Escherichia coli* K-12: Role of adhesins and motility. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 131(4), 381-389. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2020.12.002>
- Gordon, S. A., & Weber, R. P. (1951). Colorimetric estimation of indoleacetic acid. *Plant Physiology*, 26(1), 192. <https://doi.org/10.1104/pp.26.1.192>
- Hendricks, C. W., Doyle, J. D., & Hugley, B. (1995). A new solid medium for enumerating cellulose-utilizing bacteria in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(5), 2016–2019. <https://doi.org/10.1128/aem.61.5.2016-2019.1995>
- ISTA. (2019).). *Internasional Standard Proficiency Test*. <https://www.seedtest.org/>
- Istiyova, L. R., & Santosa, S. (2023). Isolasi bakteri pelarut kalium rhizosfer padi di Sragen sebagai ketahanan dan pertumbuhan tanaman. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*, 9(1), 50-56. <https://doi.org/10.23917/bioeksperimen.v9i1.19130>
- Jaya, D.K., Hasibuan, S.Y.K. & Bria, D. (2021). Isolation and characterization of potassium-solubilizing bacteria from two different rhizospheres and a cow manure in IPB University. *Jurnal Biologi Tropis*, 21(2):236-242. <https://doi.org/10.29303/jbt.v21i2.2559>
- Kafle, K., Shin, H., Lee, C.M., Park, S. & Kim, S.H. (2015). Progressive structural changes of avicel, bleached, softwood, and bacterial cellulose during enzymatic hydrolysis. *Scientific*

- Reports*, 5(1):15102.
<https://doi.org/10.1038/srep15102>
- Kholifi, K., Wardhani, M.K. & Muhsoni, F.F. (2021). Parameter lingkungan habitat mangrove di Kecamatan Modung Kabupaten Bangkalan. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 2(2):76-86.
<http://doi.org/10.21107/juvenil.v2i2.10631>
- Khoso, M., Wagen, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T., Manghwar, H. & Liu, F. (2023). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress*.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100341>.
- Komalasari, W.B. (2024). *Analisis Kinerja Perdagangan Jagung*. Jakarta: Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Sekretariat Jendral Kemetrian Pertanian 2024.
- Latuharhary, R.A. & Saputro, T.B. (2017). Respon morfologi tanaman jagung (*Zea mays*) varietas bisma dan srikandi kuning pada kondisi cekaman salinitas tinggi. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 6(2):E29-E33.
<https://doi.org/10.12962/j23373520.v6i2.25194>
- Liu, W., Chen, F., Wang, C., Fu, H., Fang, X., Ya, J. & Shi, J. (2019). Indole-3-acetic acid in *Burkholderia pyrrocinia* JK-SH007: enzymatic identification of the indole-3-acetamide synthesis pathway. *Frontiers in Microbiology* 10:2559.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02559>
- Luo, Z., Zhong, Q.-S., Han, X., Hu, R., Liu, X., Xu, W., Wu, Y., Huang, W., Zhou, Z.-X., Wei, Z., Yan, Q., He, Z., & Wang, C. (2021). Depth-dependent variability of biological nitrogen fixation and diazotrophic communities in mangrove sediments. *Microbiome*, 9(1):212.
<https://doi.org/10.1186/s40168-021-01164-0>
- Mogea, R. A., Intan, W., La, C., Putri, H., & Abubakar, H. (2022). Isolasi bakteri penghasil indole acetic acid pada tanaman hortikultura di Perkebunan Prafi SP 1 , Manokwari. *Jurnal Ilmu Pertanian* 27(1), 1–6.
<https://doi.org/10.18343/jipi.27.1.1>
- Muhiddin. 9 Juli 2025. Mentan perkuat sinergi bersama Polri wujudkan swasembada jagung. *ANTARA*: [kolom 1-2].
<https://www.antaranews.com/berita/4955905/mentan-perkuat-sinergi-bersama-polri-wujudkan-swasembada-jagung>
- Özdal, M., Özdal, G., Özdal, Sezen, A. & Algur, ÖF. (2016). Biosynthesis of indole-3-acetic acid by *Bacillus cereus* immobilized cells. *Cumhuriyet Science Journal*, 37(3): 212.
<https://doi.org/10.17776/csj.34085>
- Pattern, C.L. & Glick, B.R. 2002. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(8):3795-3801.

- <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>
- Pohan, S.R., Manalu, K. & Nasution, R.A. (2024). Isolasi dan identifikasi bakteri endofit penghasil hormon IAA (*indole acetic acid*) dari akar tanaman mangrove *Avicennia marina*. *BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi dan Sains*, 7(1):294-308. <https://doi.org/10.31539/bioedusains.v7i1.9968>
- Pratama, D. S., & Hernowo, K. (2025). Respon pertumbuhan dan hasil tanaman jagung manis terhadap aplikasi pupuk N, P, P dan giberelin pada lahan gambut. *Sustainability Nexus: Journal of Agriculture*, 1(4):306-314. <https://doi.org/10.26418/snja.v1i4.98604>
- Rahmawati, Sevindrajuta, Purnawati, Y., Sabri, Y., Akbar, Y., Desriana, Daniati, A. & Suryani. (2022). Pupuk organik cair lamtoro dan arang tempurung kelapa meningkatkan kualitas kimia tanah. *Jurnal Katalisator*, 7(2):366-378. <https://doi.org/10.22216/jk.v5i2.5717>
- Rekha, P.D., Lai, W.A., Arun, A.B. & Young, C.C. (2007). Effect of free and capsulated *Pseudomonas putida* CC-FR2-4 and *Bacillus subtilis* CC-pg104 on plant growth under gnotobiotic conditions. *Bioresource Technology*, 98(2):447-451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.009>
- Setiawati, M.R., Linda, L.N., Kamaluddin, N.N., Suryatmana, P. & Simarmata, T. (2021). Aplikasi pupuk hayati, amelioran, dan pupuk NPK terhadap N total, P tersedia serta pertumbuhan dan hasil jagung pada inceptisols. *Jurnal Agro*, 8(2), 298–310. <https://doi.org/10.15575/15121>
- Singh, P., Singh, R., Li, H., Guo, D.-J., & Sharma, A. (2021). Diazotrophic bacteria *pantoea* dispersa and *enterobacter asburiae* promote sugarcane growth by inducing nitrogen uptake and and defense-related gene expression. *Frontiers in Microbiology*, 11:1–20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.600417>
- Sommer, A.S., Coelho, C.M.M., Padilha, M.S., Carlesso, C. & Garcia, J. (2024). Vigor of hybrid corn seeds is determinant for the establishment of seedlings in the field. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 23(1), 62–69. <https://doi.org/10.5965/223811712312024062>
- Song, Q., Deng, X., Song, R., & Song, X. (2023). Three plant growth-promoting rhizobacteria regulate the soil microbial community and promote the growth of maize seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(12):7418-7434. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11019-7>
- Sulaeman, Y., Maftu, E., Noor, M., Hairani, A., Nurzakiah, S., Mukhlis, M., Anwar, K., Fahmi, A., Saleh, M., Khairullah, I., Rumanti, I. A., Alwi, M., Noor, A., & Ningsih, R. D. (2024). Coastal acid-sulfat soils of Kalimantan, Indonesia, for food security: Characteristic, management, and future directions.

- Resources*, 13(3):36.
<https://doi.org/10.3390/resources1303036>
- Suleimanova, A., Bulmakova, D., Sokolnikova, L., Egorova, E., Itkina, D., Kuzminova, O., ... & Sharipova, M. (2023). Phosphate solubilization and plant growth promotion by *Pantoea brenneri* soil isolates. *Microorganisms*, 11(5): 1136.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11051136>
- Tiara, R. (2025). Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Pelarut Fosfat dari Hutan Mangrove Bengkalis sebagai Agen Biofertilizer. [skripsi]. Pekanbaru: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau.
- Triani, H.D., Marlida, Y., Yuniza, A., Astuti, W.D. & Husmaini. (2024). Isolation and screening of cellulolytic bacteria from landfill of cassava waste. Di dalam: The 3rd International Conference on Animal Production for Food Sustainability. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1341 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1341/1/012066>
- Utami, S., Winarni, I., & Kurniawati, H. (2024). Identification of cellulose degrading bacteria FROM mangrove sediment at Blanakan, West Java, Indonesia. *4TH International Conference on Current Trends in Materials Science and Engineering 2022*.
<https://doi.org/10.1063/5.0202022>.
- Wang, J., Gao, X., Yang, M., Zhang, Y. & Chen, Y. (2025). Alleviative effects of plant growth-promoting rhizobacteria on salt-stressed rice seedlings: mechanisms mediated by rhizosphere microbiota and root exudates. *Frontiers in Plant Science*, 16:1661074.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1661074>.
- Wang, S., Jiang, L., Zhao, Z., Chen, Z., Wang, J., Alain, K., Cui, L., Zhong, Y., Peng, Y., Lai, Q., Dong, X., & Shao, Z. (2024). Chemolithoautotrophic diazotrophs dominate dark nitrogen fixation in mangrove sediments. *The ISME Journal*, 18(1):wrae119.
<https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae119>
- Xu, Z., Dai, J., Yang, N., Fan, Y., Shan, X., Diao, Y., Pan, X., Zhao, L., Zhao, J., M., Li, X., Xiao, M., & Pei, J. (2026). Enhancing soil fertility in urban green spaces via cellulolytic microbial-organic synergies. *Frontiers in Microbiology*, 17: 1711396.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1711396>.
- Yadav, A. N. (2022). Potassium-solubilizing microorganisms for agricultural sustainability. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*. 19:1-6.
<https://doi.org/10.7324/jabb.2022.105ed>
- Yang, M., Qin, X., Yue, C., Tian, P., Wu, Z., Wu, Q., & Wu, L. (2025). Phosphate-solubilizing and polymerizing bacteria enhance phosphorus availability and growth of rice. *Frontiers in Microbiology*, 16: 1700135.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1700135>